

Оценка влияния скорости перемещения абонентов на удельную интенсивность потока потерь соединений в сетях с OFDM-сигналами

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

УДК 004.056.5: 658.5.012.7

Аннотация. Найдены соотношения, устанавливающие связь между интенсивностью потерь соединений в сетях подвижной связи с OFDM и скоростью перемещения абонентов. Определено, что наиболее высокая интенсивность потерь возникает в линиях с наиболее сложными видами модуляции (QAM64). Выявлено, что для более простых видов модуляции (QPSK) воздействие от перемещений абонентов сильного влияния не оказывает. Также показано, что в основных для сети McWILL диапазонах 300...400 МГц, перемещение абонентов вплоть до скоростей 100 м/с не оказывает влияния на интенсивность обрывов. Одновременно для базового диапазона LTE 2600 МГц установлено, что на скоростях 30 м/с и выше интенсивность обрывов становится недопустимо большой.

Ключевые слова: интенсивность потока, системы подвижной связи, OFDM, скорость движения, Марковский процесс.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из ключевых показателей, повсеместно используемых в сетях мобильной связи для описания качества работы, является процент обрывов пользовательских соединений (Drop Call Rate), напрямую связанный с интенсивностью потока обрывов. Важно установить, как именно на интенсивность обрывов могут влиять другие, первичные физические характеристики, связанные с условиями и организацией работы в сети. Одна из таких характеристик — скорость перемещения мобильных абонентов. Факт ее влияния на обрывы неоспорим [1–3]. Результаты драйв-тестов, проводимые повсеместно операторами, подтверждают это. На данный момент даже сформировалось правило проведения драйв-тестов на скоростях движения не более 50–60 км/час, так как повышение скорости может приводить к заметному изменению результатов и, в частности, к существенному повышению показаний по уровню обрывов.

В таких условиях представляется важным установить связь между интенсивностью потока обрывов соединений и скоростью движения в аналитической универсальной форме, а также определить, какие дополнительные параметры участвуют в указанной связи и, как следствие, найти способы снижения влияния высоких скоростей перемещения на интенсивность обрывов соединений в сетях мобильной связи. Этим вопросам посвящена настоящая работа.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для того чтобы связать интенсивность потока потерь соединений с уровнем сигнала на приеме воспользуемся методикой, предложенной в монографии [4, стр. 267]. Она основана на полученном аналитическом соотношении для вероятности выбросов (или, что эквивалентно, интенсивности потока выбросов) стационарного Марковского процесса за высокий порог. В это соотношение

в качестве аргумента входит в стационарную плотность распределения Марковского процесса, которая бы наблюдалась в условиях без порога:

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

где λ_0 — параметр, задающий вероятность выброса за порог x_1 Марковского процесса $x(t)$; $w_{ct}(x')$ — стационарное распределение Марковского процесса $x(t)$; K — коэффициент диффузии Марковского процесса $x(t)$; b — точка в области аргумента с наибольшими значениями $w_{ct}(x')$. Обычно в качестве такой точки выбирают позицию моды. В (1) сохранены обозначения из [4].

Проанализируем связь входящих в (1) параметров с характеристиками, описывающими движение абонентов и работу линий связи мобильных сетей. В сетях мобильных абонентов потеря соединения происходит при возникновении замираний, приводящих к провалу уровня принимаемого сигнала ниже критического порога:

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

где P_s — уровень полезного сигнала на приеме; P_{N+I} — уровень собственных шумов и помех; H — пороговое значение амплитуды, ниже которого прием сигнала становится невозможным.

Рабочие характеристики современных приемных систем с исправлением ошибок таковы, что полная деградация происходит практически одномоментно при переходе точки критического уровня, задаваемой порогом H . Этот уровень достаточно точно определяется видом модуляции (QPSK, QAM16, QAM64 — для сетей 4G) и информационной скоростью кодеров, исправляющих ошибки (наиболее распространены скорости $R = 1/4, 1/3, 1/2, 3/4$ и 1). Обычно считают, что замирания сигнала подчиняются логнормальному или обобщен-

ному Релеевскому (χ^2 -распределение) законам [5]. Именно эти законы при расчете интенсивности по (1) будем использовать в качестве стационарного распределения:

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

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

В приведенных законах нормировка произведена так, чтобы аргумент моды равнялся 1, т.е. наиболее вероятный уровень сигнала принят за единичный. Нужно заметить, что в случае Релеевских замираний закон связан с амплитудой сигнала, а в логнормальном варианте распределение описывает поведение уровня сигнала в логарифмическом представлении через шкалу децибелов.

Подбирая коэффициенты сноса и диффузии так, чтобы стационарное распределение, получаемое из решения уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова [6], совпадало с записанными законами, можно найти выражения для коэффициента диффузии K , значение которого необходимо для использования в (1):

$$K = \frac{2}{\tau_{\text{cor}}} \frac{1}{2N_L-1}; K = \frac{2}{\tau_{\text{cor}}} \sigma_{\text{дБ}}^2,$$

где τ_{cor} — время корреляции замираний. Так как нас интересуют замирания, приводящие к потере соединений, то их интервал корреляции должен превосходить время счетчика контроля. Обычно оно устанавливается в сети в пределах 5–10 с, т.е. правомерно ориентироваться на $\tau_{\text{cor}}=10$ с.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Теперь имеем необходимые данные для решения поставленной задачи. При расчете интенсивности потока обрывов нужно вместо x_1 в (1) подставить некоторое достаточно малое пороговое значение H (обозначение выбрано в соответствии с принятым определением порога). Пока будем его понимать в общем смысле. А после получения искомым соотношений установим, как указанное значение порога зависит от типа модуляции, информационной скорости кодирования R и скорости движения абонента. Это позволит определить характер связи между интенсивностью потока потерь соединений и скоростью движения.

Подставляя записанные законы распределения в (1) и используя найденные соотношения для коэффициента диффузии, после некоторых технических преобразований найдем выражения для интенсивности обрывов ω :

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

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

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

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

Воспользуемся разложением интегральной показательной функции

$$E_i(u) = \gamma + \ln(|u|) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{u^n}{nn!},$$

где $\gamma = 0,57721566$ — постоянная Эйлера. Тогда, в предположении относительно малых значений H , можно получить упрощенные формулы расчета интенсивности потока обрывов соединений для Релеевских замираний:

$$\begin{aligned} N_L = 1, \omega(H) &\approx \frac{2}{\tau_{\text{cor}}} \left[-2 \ln H + 0,570151 - \frac{1}{2} H^2 \right]^{-1}; \\ N_L = 2, \omega(H) &\approx \frac{2}{\tau_{\text{cor}}} \left[\frac{2}{3} \frac{1}{H^2} - 2 \ln H + 0,330812 - \frac{3}{4} H^2 \right]^{-1}; \\ N_L = 3, \omega(H) &\approx \frac{2}{\tau_{\text{cor}}} \left[\frac{2^2}{5^2} \frac{1}{H^4} + \frac{2^2}{5} \frac{1}{H^2} - 2 \ln H + 0,258063 - \frac{5}{6} H^2 \right]^{-1}; \\ N_L = 4, \\ \omega(H) &\approx \frac{2}{\tau_{\text{cor}}} \left[\frac{2^4}{7^3} \frac{1}{H^6} + \frac{2^2 \cdot 3}{7^2} \frac{1}{H^4} + \frac{2 \cdot 3}{7} \frac{1}{H^2} - 2 \ln H + 0,219105 - \frac{7}{8} H^2 \right]^{-1}; \\ N_L = 5, \omega(H) &\approx \frac{2}{\tau_{\text{cor}}} \left[\frac{2^5}{3^7} \frac{1}{H^8} + \frac{2^6}{3^9} \frac{1}{H^6} + \frac{2^3}{3^5} \frac{1}{H^4} + \frac{2^3}{3^2} \frac{1}{H^2} - 2 \ln H + 0,193832 - \frac{9}{10} H^2 \right]^{-1}; \\ N_L = 6, \\ \omega(H) &\approx \frac{2}{\tau_{\text{cor}}} \left[\frac{2^8 \cdot 3}{11^5} \frac{1}{H^{10}} + \frac{2^5 \cdot 3 \cdot 5}{11^4} \frac{1}{H^8} + \frac{2^5 \cdot 5}{11^3} \frac{1}{H^6} + \frac{2^3 \cdot 5}{11^2} \frac{1}{H^4} + \frac{2 \cdot 5}{11} \frac{1}{H^2} - \right. \\ &\quad \left. - 2 \ln H + 0,175717 - \frac{11}{12} H^2 \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (2)$$

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

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

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

Выражения (2), (3) задают интенсивность потока событий, связанных с уходом замирающего сигнала под пороговый уровень H^2 . Для решения задачи остается определить, каким является указанный порог, как он зависит от типа модуляции и ошибок синхронизации по частоте, возникающих при движении абонента.

Современные системы цифровой обработки сигналов используют коды с исправлением ошибок, которые обеспечивают на выходе практически полностью очищенный от ошибок сигнал (для удовлетворительной работы приложений), если на их входе вероят-

ность ошибки на бит (BER) не превосходит $1/30 - 1/20$. Когда ошибки начинают незначительно превышать указанный уровень, как правило, происходит полное нарушение работы линии связи. С точки зрения работы демодулятора, вероятность ошибки на бит порядка $1/25$ возникает при уровне шума $\sigma = 0,5/1,7507 \approx 1/2\sqrt{3}$ от расстояния между соседними точками амплитудно-фазового созвездия. В пересчете к среднему уровню полезного сигнала получаем:

$$P_N = \frac{1}{6} P_S = \frac{1}{6} - \text{для QPSK}; P_N = \frac{1}{30} P_S = \frac{1}{30} - \text{для QAM16};$$

$$P_N = \frac{1}{126} P_S = \frac{1}{126} - \text{для QAM64}.$$

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

В современных системах связи в линиях используются комбинированные кодеки, в которых перед кодом, исправляющим ошибки, применяют сверточное кодирование [7]. Работа сверточного кодера приводит к эффективному повышению отношения сигнал/шум (ОСШ), которое в первом приближении можно оценить значением $1/R$, где R — информационная скорость сверточного кода. С учетом этого, запишем пороговые уровни замирающего сигнала, при которых начинает пропадать связь:

$$\begin{aligned} H^2 &= 6P_N R - \text{для QPSK}; H^2 = 30P_N R - \text{для QAM16}; \\ H^2 &= 126P_N R - \text{для QAM64}. \end{aligned} \quad (4)$$

Соотношения (4) определяют как рассчитывать порог H по уровню шума P_N . А поскольку используется представление с $P_S = 1$, то вместо P_N можно написать

$$P_N = 1/z, \text{ где } z = \frac{P_S}{\sigma_m^2} - \text{ОСШ на входе демодулятора при}$$

отсутствии замираний и точной частотной синхронизации. Тогда (4) можно представить в обобщенном виде:

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

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 к шумам будет добавляться помеха с уровнем [8] $P_S \rho_v$,

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

$$\varepsilon = \frac{\delta f}{\Delta f} = \frac{f_0 \frac{2v}{c}}{\Delta f} - \text{ошибка синхронизации по частоте, воз-}$$

Рисунок 1

Зависимости удельных интенсивностей обрывов соединений от уровня ОСШ в канале при различных скоростях перемещения абонентов. Релеевские замирения с $N_L = 3$ (три луча)

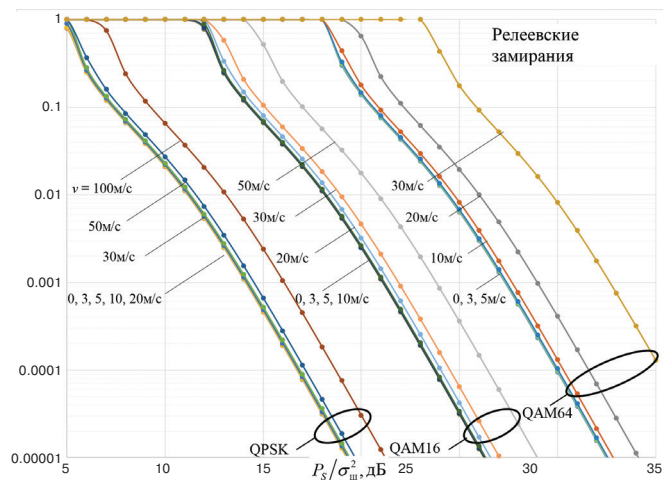
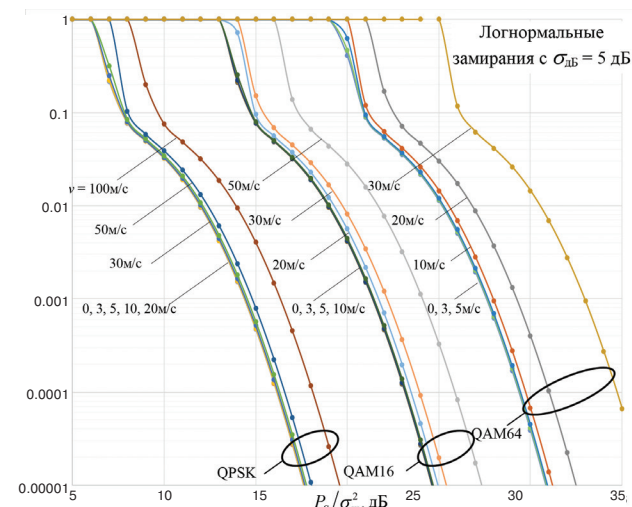


Рисунок 2

Зависимости удельной интенсивности обрывов соединений от ОСШ для различных скоростей перемещения абонентов в условиях логнормальных замираний с $\sigma_{\text{дБ}} = 5$ дБ



никающая из-за движения абонента; f_0 — несущая частота; Δf — разнос поднесущих в OFDM; c — скорость света; v — компонента скорости перемещения абонента в направлении на БС. С учетом этой добавки, уравнение для порога примет вид:

$$H^2 = Q_{\text{mod}} R \left(\frac{1}{z} + H^2 \frac{\rho}{v} \right).$$

Откуда получаем:

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

Сравнение (6) с (5) показывает, что из-за ошибок синхронизации по частоте, возникающих при дви-

жении абонента, происходит увеличение в $\frac{1}{1 - Q_{\text{mod}} R \rho_v}$ раз

нижнего порога замираний, определяющего возникновение обрывов связи.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Соотношения (2), (3) и (6) позволяют рассчитать 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 приведены зависимости интенсивности потока обрывов соединений от уровня P_s / σ_m^2 на входе демодулятора, рассчитанные по полученным формулам в условиях работы на частоте 1792,5 МГц (центр защитной полосы диапазона 1800 МГц — диапазон №9 по рекомендации 3GPP TS 136.104), а также рассмотрены

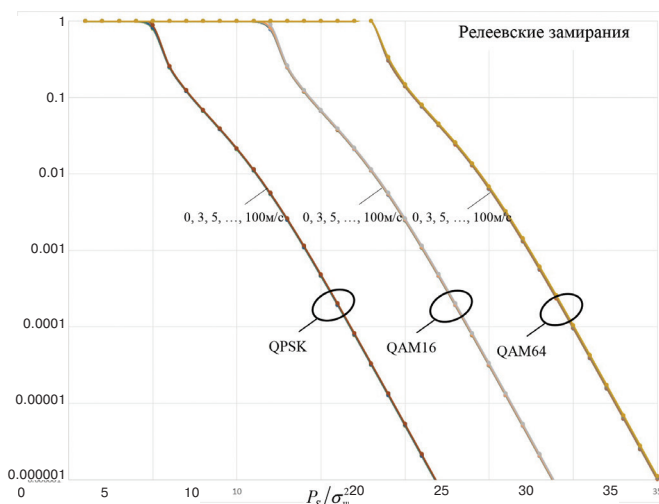
случаи применения различных видов модуляции и различные скорости движения абонентов.

Зависимости на рис. 1 получены для обобщенных Релеевских замираний с тремя лучами, а на рис. 2 — для логнормальных со среднеквадратической глубиной 5 дБ. Как можно видеть, модуляция QPSK отличается высокой устойчивостью к перемещению абонентов. Только начиная со скоростей 100 м/с (авиационные), наблюдается заметное повышение интенсивности отказов, которое можно охарактеризовать как эффективное уменьшение ОСШ на 2,5 дБ.

Модуляция QAM16 проявляет большую чувствительность к движению абонента. На скоростях 100 м/с

Рисунок 3

Зависимости удельных интенсивностей обрывов соединений от ОСШ в сети McWILL, работающей на частоте 339 МГц. Релеевские замирения с $N_L = 3$ (три луча)



реализовать связь с этой модуляцией нельзя. Потери в представлении эффективного уменьшения ОСШ заметны на скорости 50 м/с и составляют порядка 2,5 дБ. Самую высокую чувствительность к перемещению абонентов демонстрирует модуляция QAM64. Для нее нельзя организовать связь при скоростях выше 35 м/с. Это соответствует данным эксплуатации сетей LTE в поездах САПСАН. Они показывают, что начиная со скоростей 120–130 км/час, высокоскоростная связь в линиях не поддерживается. Для модуляции QAM64 уже при скоростях 30 м/с произойдет существенное увеличение интенсивности потока обрывов. В представлении снижения эффективного ОСШ потери составят около 4 дБ.

В более низких диапазонах частот, например 300...400 МГц (базовые для стандарта McWILL), влияние скорости движения заметно снижается. На рис. 3 приведены результаты расчета зависимости интенсивности обрывов от ОСШ для работы на несущей 339 МГц.

Результаты показывают практическое отсутствие зависимости от скоростей движения абонентов до 100 м/с. В

диапазоне 2600 МГц (базовом для LTE) влияние движения абонентов будет даже выше, чем показано на рис. 1 и 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные аналитические соотношения устанавливают связь между интенсивностью потока потерь соединений в системах подвижной связи с сигналами OFDM и скоростью перемещения абонентов. Выявлено, что самой высокой степени деградации подвержены линии с более сложными видами модуляции (QAM64). При использовании более простых видов модуляции, например QPSK, влияние скорости движения остается умеренным. Для сетей LTE установлено, что линии связи с модуляцией QAM64 не будут поддерживаться при скоростях перемещения абонентов более 30 м/с.

В сетях McWILL при работе в базовых диапазонах 300...400 МГц движение абонентов вплоть до скоростей 100 м/с не влияет на интенсивность обрывов. В базовом диапазоне для LTE 2600 МГц расчет показал возможность работы с модуляцией QAM64 только до скоростей 20 м/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sesia S., Toufik I., Baker M. LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice. – John Wiley & Sons, Ltd., Publication. – 2011.
2. Rugini L., Banelli P. Banded Equalizers for MIMO-OFDM in Fast Time-Varying Channels // 14th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2006). – Florence, Italy, 4–8 September 2006; copyright by EURASIP.
3. Шорин О.А. Методы оптимального распределения частотно-временного ресурса

- в системах подвижной радиосвязи // Диссертация на соискание ученой степени д.т.н. – М.: МТУСИ, 2005. – 263 с.
4. Стратонович Р.Л. Избранные вопросы теории флуктуаций в радиотехнике. – М.: Сов. радио, 1961. – 558 с.
5. Бакулин М.Г., Крейнделлин В.Б., Шлома А.М., Шумов А.П. Технология OFDM. – М.: Горячая линия–Телеком, 2016. – 352 с.
6. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. – М.: Радио и связь,

2004. – 608 с.

7. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. – М.: Техносфера, 2005. – 320 с.
8. Аверьянов Р.С., Шорин А.О. Оценка оптимальных параметров OFDM-сигналов с учетом мобильности абонентов // Электро-связь. – 2015. – № 12. – С. 60–65.

Получено 03.10.16