



Оценка влияния эффекта Доплера на качество радиосвязи в условиях высокоскоростного движения



Любовь ЖУРАВЛЁВА



Михаил НИЛОВ



Владимир ЛОШКАРЕВ



Владислав ЛЕВШУНОВ

Журавлёва Любовь Михайловна – Российский университет транспорта, Москва, Россия.

Нилов Михаил Алексеевич – ПАО «Мегафон», Москва, Россия.

Лошкарёв Владимир Леонидович – ПАО «Мегафон», Москва, Россия.

Левшунов Владислав Витальевич – ПАО «МАХИМ», Москва, Россия.*

В статье предложена методика оценки искажений радиосигнала от действия эффекта Доплера (ЭД) в условиях высокоскоростного движения поездов. Цель работы – разработка критериев оценки качества радиосвязи с подвижными объектами в условиях высокоскоростного движения поездов. Для этого предложена методика расчёта вероятности ошибки, возникающей в результате действия эффекта Доплера. Дано обоснование актуальности темы для железнодорожного транспорта, где посредством радиосвязи осуществляется управление движением поездов и обеспечение безопасности. Достижение требуемого качества радиосигналов является главной задачей. Особенно важна оценка качества при организации широкополосных каналов связи с машинистами подвижных составов с помощью сетей мобильной связи. Для решения этой задачи рассмотрена модель оценки качества радиосвязи в условиях действия ЭД. Искажения сигналов в радиоканале за счёт эффекта Доплера предложено оценивать с помощью приведён-

ной дисперсии суммарной погрешности, которая состоит из двух составляющих: динамической и помеховой. Представлены расчёты суммарной приведённой погрешности сигнала и вероятности ошибки для скоростей движения выше 100 км/ч. Кроме того, даны оценки влияния ЭД на когерентный приёмник, в котором могут возникать ошибки за счёт изменений длительности радиоимпульсов.

Приведён анализ эффективности системы автоматической подстройки частоты (АПЧ) приёмника как средства борьбы с ЭД. Для этого введено понятие мгновенного спектра паразитной частотной модуляции за счёт ЭД, и с помощью приведённой дисперсии суммарной погрешности рассчитано качество радиосвязи. Эффективность использования АПЧ доказана после сравнения оценок качества приёма с АПЧ и без него в виде отношения вероятностей ошибок. Сформулированы особенности использования мобильной связи на железнодорожном транспорте в условиях действия ЭД.

Ключевые слова: железная дорога, высокоскоростное движение, эффект Доплера, искажения, скорость движения поезда, автоматическая подстройка частоты, радиосигнал, качество радиосвязи.

*Информация об авторах:

Журавлёва Любовь Михайловна – доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте Российского университета транспорта, Москва, Россия, zhlubov@mail.ru.

Нилов Михаил Алексеевич – инженер отдела развития пакетной сети ПАО «Мегафон», Москва, Россия, asp-nil@bk.ru.

Лошкарёв Владимир Леонидович – инженер отдела наложенных сетей ПАО «Мегафон», Москва, Россия, bartok890@mail.ru.

Левшунов Владислав Витальевич – инженер отдела внедрения ПАО «МАХИМ», Москва, Россия, Levshunov1122@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 11.01.2020, принята к публикации 24.06.2020.

For the English text of the article please see p. 63.

1. АКТУАЛЬНОСТЬ

Управление движением поездов и обеспечение безопасности на железнодорожном транспорте возможно только с применением систем радиосвязи. От качества функционирования радиоканалов зависят показатели эффективности перевозочного процесса и безопасности движения поездов. Достижение требуемого качества радиосигналов является главной задачей при организации широкополосных каналов связи с машинистами. Решение этой задачи особенно актуально для передачи на подвижной состав тревожной информации. Такие сигналы формируются в системах видеонаблюдения при обнаружении опасных ситуаций на объектах железнодорожного транспорта (переездах, мостах, тоннелях) и передаются с помощью сети мобильной связи. Оценка качества радиосвязи должна учитывать не только воздействие внешних помех от контактной сети, работающих двигателей и других источников шума, но и интерференционные искажения, возникающие за счёт многолучевого характера распространения отражённых от препятствий сигналов, а также эффекта Доплера (ЭД). Эффект Доплера – это изменение несущей частоты, вызванное перемещением источника или приёмника сигнала [1, с. 139–142].

Цель работы заключается в оценке влияния эффекта Доплера на качество радиосвязи и способов борьбы с последствиями ЭД. В качестве критерия и оценки качества радиосвязи принята вероятность ошибки цифрового сигнала, возникающей за счёт доплеровского рассеяния несущей частоты. В основе методики расчёта вероятности ошибки лежит определение приведённой дисперсии погрешности полезного сигнала из-за действия паразитной частотной модуляции, вызванной ЭД.

Предложенный в статье способ расчёта приведённой дисперсии погрешности позволил оценить эффективность уменьшения искажений с помощью схемы автоматической подстройки частоты несущего сигнала. Такая задача приобретает особое значение в связи с внедрением высокоскоростного движения поездов и систем Wi-Fi для улучшения обслуживания пассажиров и повышения безопасности. Для реализации этой цели необходимы методики

оценки искажений от ЭД и анализ эффективности способов борьбы. Результаты аналогичных исследований влияния эффекта Доплера на качество радиосвязи в условиях высокоскоростного движения (ВСД) приведены в [1; 2]. В странах, имеющих развитую сеть ВСМ, например, в КНР, где скорости движения поездов могут превышать значение 400 км/ч, проблемы, связанные с эффектом Доплера, стоят особенно остро. Предложенные в [1; 2] два способа борьбы с искажениями от действия ЭД основаны на принципе автоподстройки несущей частоты (АПЧ), которая отслеживает изменения несущей частоты f_0 и производит её подстройку. В первом способе автоматическая подстройка частоты в приёмнике осуществляется с помощью прогнозирования смещения несущей Δf_0 во времени в зависимости от изменений скорости движения поезда. Для этого используется специальная программа, в основе которой лежит вычисление конечных разностей высокого порядка ($N \geq 2$), что характерно для немарковских случайных процессов. Полученное значение приращения ($\pm \Delta f_0$) подстраивает частоту гетеродина приёмника. Такой способ требует большого вычислительного ресурса и высокого быстродействия элементной базы. Реализация этого «алгоритма компенсации» ЭД на основе обработки большого объёма информации возможна с помощью электроники нового поколения. В простейшем варианте в схеме АПЧ вырабатывается управляющий сигнал, являющийся разностью текущего и предыдущего значений марковского ($N = 1$) случайного процесса (изменений частоты несущего сигнала), что соответствует конечной разности первого порядка. Использование предыстории процесса в случае представления колебаний несущей частоты в виде немарковского процесса позволяет более точно оценить величину $\pm \Delta f_0$ и подстроить сигнал гетеродина приёмника.

Второй способ – это регулирование частоты гетеродина приёмника с помощью пилот-сигналов, добавляемых в цифровые последовательности (кадры данных) на передающей стороне. Назначением пилот-сигнала является отслеживание условий распространения радиосигнала, в том числе сдвига несущей частоты за счёт ЭД.



После детектирования на приёмной стороне информация об изменениях несущей частоты используется для подстройки генератора. В отличие от первого способа, для использования пилот-сигналов не нужны вычислительные устройства, но требуются дополнительные каналные ресурсы, например, по полосе частот. В условиях высокоскоростного движения более эффективным способом борьбы с ЭД является метод прогнозирования изменений несущей Δf_0 , который позволяет более точно предугадать отклонение несущей от номинального значения.

Смещение несущих частот в результате действия ЭД влечёт за собой нарушение принципа ортогональности и межчастотную интерференцию.

В настоящее время большинство радиосистем (например, в мобильной связи) ориентировано на использование сигналов с ортогональным частотным уплотнением (OFDM) [3]. В основе принципа ортогональности лежит коэффициент функции корреляции, позволяющий выбрать систему ортогональных функций, обеспечивающих наилучшее качество передачи. При совпадении входного и опорного сигналов в канале приёмника коэффициент корреляции равен максимальному значению, в противном случае он равен нулю. Такой способ формирования группового сигнала позволяет повысить его спектральную плотность путём наложения спектров соседних поднесущих частот. При этом смежные поднесущие спектры не интерферируют. Нарушение условия ортогональности поднесущих частот приводит к межчастотной интерференции. Одной из причин нарушения принципа ортогональности является действие ЭД, происходящее в результате изменений скорости движения объекта, на котором установлен приёмо-передатчик. Следствием появления эффекта Доплера является доплеровский сдвиг поднесущей частоты и искажения сигнала [3; 4].

Таким образом, при использовании пассажирами поезда сети мобильной связи (МС) на качество сигнала может оказать влияние скоростной режим движения. Для оценки влияния скорости движения поезда на качество радиосвязи нужно разработать методику расчёта искажений сигнала в результате действия ЭД.

2. ОЦЕНКА ИСКАЖЕНИЙ СИГНАЛА В РАДИОКАНАЛЕ ЗА СЧЁТ ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА

Искажения сигнала в радиоканале за счёт эффекта Доплера происходят из-за наступления паразитной частотной модуляции (ПЧМ). Это проявляется следующим образом:

1) потеря части мощности полезного сигнала, не прошедшей через усилитель (фильтр) промежуточной частоты (УПЧ) приёмника при сдвиге несущей частоты f_0 на величину паразитной девиации f_d (динамическая составляющая погрешности), причём увеличение f_0 происходит, например, в случае приближения приёмника МС к базовой станции (БС), уменьшение f_0 – в случае отдаления от БС;

2) попадание спектров соседних каналов (смежных поднесущих частот) в полосу УПЧ (помеховая составляющая погрешности).

Искажения можно оценить с помощью дисперсии суммарной погрешности σ_ε^2 на выходе приёмника, которая состоит из двух составляющих (динамической $\sigma_{\text{дин}}^2$ и помеховой $\sigma_{\text{пом}}^2$). При условии прямоугольной формы нормированной спектральной плотности мощности огибающей радиоимпульса $S_\lambda(\omega)$, имеющей косинусоидальную форму зависимости амплитуды от времени [5], и идеального усилителя промежуточной частоты (УПЧ) можно записать следующие соотношения (рис. 1):

$$\sigma_{\text{дин}}^2 = \sigma_{\text{пом}}^2; \sigma_\varepsilon^2 = \sigma_{\text{дин}}^2 + \sigma_{\text{пом}}^2 = 2\sigma_{\text{эд}}^2.$$

Отсюда, приведённая дисперсия суммарной погрешности от действия ЭД, равная отношению мощности σ_ε^2 к мощности полезного сигнала, будет иметь вид:

$$\delta_{\varepsilon\text{эд}}^2 = \frac{2\sigma_{\text{эд}}^2}{\sigma_{\text{чм}}^2}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{чм}}^2$ – дисперсия (мощность) частотно-модулированного сигнала (радиоимпульса с длительностью $\tau_{\text{чмп}}$).

Формула (1) верна для обоих случаев движения: сближения приёмника с БС (частота повышается) или удаления его от БС (частота понижается).

Для принятых выше условий (рис. 1) можно записать выражение дисперсии $\sigma_{\text{эд}}^2$ [5]:

$$\sigma_{\text{эд}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_0 + (\Delta\omega_p)/2}^{\omega_0 + ((\Delta\omega_p)/2) + \Delta\omega_{\text{ПЧМ}}} S_\lambda(\omega) d\omega, \quad (2)$$

$$\sigma_{\varepsilon}^2 = \sigma_{\text{дин}}^2 + \sigma_{\text{ном}}^2$$

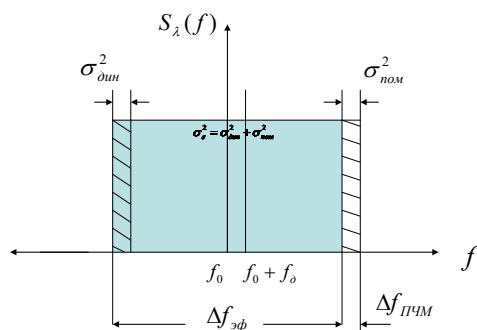


Рис. 1. К расчёту приведённой дисперсии суммарной погрешности от действия эффекта Доплера (рисунок авторов).

где $\Delta\omega_{\text{эф}} = 2\pi\{2\Delta F_{\lambda}(M_{\text{чм}}+1)\}$ (2а) – эффективная полоса частот сигнала с частотной модуляцией (ЧМ) (эффективная полоса УПЧ) [6];

$\Delta F_{\lambda} \cong \frac{1}{\tau_{\text{имп}}}$ – эффективная полоса частот

цифрового сигнала [5];

$M_{\text{чм}}$ – индекс частотной модуляции;

$\Delta\omega_{\text{ПЧМ}} = 2\pi\{2M[f_{\text{ПЧМ}}](M_{\text{ПЧМ}}+1)\}$ (2б) – эффективная полоса частот паразитной частотной модуляции (ПЧМ), возникающей за счёт ЭД;

$M[f_{\text{ПЧМ}}]$ – среднее значение модулирующей частоты $f_{\text{ПЧМ}}$ паразитной ЧМ от действия ЭД с индексом модуляции $M_{\text{ПЧМ}}$ (рис. 2);

ω_0 – несущая круговая частота сигнала;

$S_{\lambda}(\omega) = \frac{A_{\lambda}}{2\pi}$ – спектральная плотность

мощности сигнала [5].

Отсюда, значения дисперсий $\sigma_{\text{эд}}^2$, $\sigma_{\text{чм}}^2$ и приведённой суммарной погрешности $\sigma_{\text{эд}}^2$ равны:

$$\sigma_{\text{эд}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_0 + (\Delta\omega_{\text{эф}})/2}^{\omega_0 + (\Delta\omega_{\text{эф}})/2 + \Delta\omega_{\text{ПЧМ}}} (A_{\lambda} / 2\pi) d\omega = (A_{\lambda} / (2\pi)^2) \cdot \Delta\omega_{\text{ПЧМ}};$$

$$\sigma_{\text{чм}}^2 = 2 \left[\frac{1}{2\pi} \int_{\omega_0}^{\omega_0 + (\Delta\omega_{\text{эф}})/2} (A_{\lambda} / 2\pi) d\omega \right] = (A_{\lambda} / (2\pi)^2) \cdot \Delta\omega_{\text{эф}}; \quad (3)$$

$$\delta_{\text{эд}}^2 = 2(\Delta\omega_{\text{ПЧМ}} / \Delta\omega_{\text{эф}}) = 2(\Delta f_{\text{ПЧМ}} / \Delta f_{\text{УПЧ}}),$$

где $\Delta f_{\text{эф}} = \Delta f_{\text{УПЧ}}$ – эффективная ширина полосы частот УПЧ.

Таким образом, для расчёта искажений (погрешности) от действия ЭД необходимо определить величину эффективной полосы частот ПЧМ $\Delta f_{\text{ПЧМ}}$. Для этого требуется рассчитать математическое

ожидание случайной величины $f_{\text{д}}$ и индекс ПЧМ:

$$M_{\text{ПЧМ}} = \frac{M[f_{\text{ПЧМ}}]}{M[f_{\lambda}]},$$

равный отношению средних значений модулирующей частоты ПЧМ и паразитной девиации.

3. ОЦЕНКИ ЧАСТОТЫ ДЕВИАЦИИ ПЧМ ЗА СЧЁТ ДЕЙСТВИЯ ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА

Вследствие паразитной частотной модуляции из-за действия ЭД (доплеровского рассеивания частоты) несущая частота f_0 сдвигается на величину $\pm f_{\text{д}}$. Случайная величина $f_{\text{д}}$ изменяется во времени (зависит от частоты f_0 , условий распространения сигнала, в том числе рельефа трассы, параметров перемещения подвижного объекта сети мобильной связи) [5].

Как отмечалось выше, эффект Доплера приводит к тому, что спектр полезного сигнала случайным образом «перемещается» по оси частот (рис. 1). При этом часть полезной информации теряется (не проходит через полосу УПЧ). В то же время в полосу УПЧ попадают посторонние сигналы соседних каналов, которые являются для него помехой.

Частоту девиации $f_{\text{д}}$ можно представить в виде следующего произведения: коэффициента k (учитывающего условия распространения радиосигнала, например, дождь или туман), скорости движения объекта v , несущей частоты f_0 , $\cos(q)$ – угол между расположением передатчика и направлением распространения сигнала), скорости



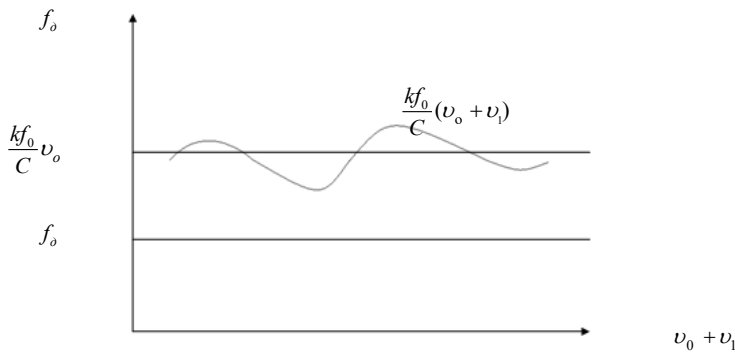


Рис. 2. График изменения девиации частоты f_d (для случая неравномерного движения объекта) по синусоидальному закону с частотой $M[f_{пмч}]$ (рисунок авторов).

света C . Выражение для расчёта частоты девиации f_d имеет следующий вид [5]:

$$f_d = \kappa \cdot v \cdot f_0 \cos q / C.$$

Для условий железнодорожного транспорта все объекты (вышки БС, подвижной состав) расположены вдоль железнодорожного полотна. Поэтому угол q между приёмником, расположенным на БС (или в кабине машиниста, или вагоне поезда), и передатчиком, находящимся на тех же объектах, приближается к нулю (что соответствует наихудшему случаю, т.е. наибольшему влиянию ЭД). Если принять $\kappa = 1$, $\cos q = 1$, то выражение для частоты девиации можно преобразовать так:

$$f_d = \frac{f_0}{C} v, \tag{4}$$

где v — скорость движения объекта, является функцией от случайных величин: ускорения a и времени движения объекта t в режиме замедления или ускорения (рис. 2).

Для расчёта ширины полосы ПЧМ и индекса паразитной частотной модуляции необходимы оценки $M[f_d]$ и $M[f_{пмч}]$, которые определяются средней скоростью движения поезда v_0 и средним временем смены скоростных режимов поезда t_d .

Тогда, согласно формуле (4), величины $M[f_d]$ и $M[f_{пмч}]$ соответственно равны:

$$M[f_d] = \frac{f_0}{C} v_0 = \frac{f_0}{C} M[\pm a \cdot t_d], \tag{5}$$

где $v_0 = M[\pm a \cdot t_d]$ — среднее значение скорости поезда при неравномерном движении;

$$M[f_{пчм}] = M\left[\frac{1}{T_d}\right], \tag{6a}$$

где $T_d = 2 t_d$ (6б) — период изменения скорости движения (по аналогии с синусоидальной зависимостью (рис. 2)).

Величина v_0 — это произведение двух независимых случайных величин, а именно: ускорения a и времени t_d . Отсюда, математическое ожидание произведения случайных величин (a и t_d) есть произведение их математических ожиданий [6], т.е.:

$$M[v_0] = M[a] \cdot M[t_d].$$

Для равновероятных законов распределения плотности вероятностей случайных величин $\phi(a) = 1/A$ и $\Psi(t_d) = 1/T$, где A , T — соответственно, предельные значения ускорения a и времени t_d (начиная с нуля), после операции усреднения получим $M[a]$ и $M[t_d]$:

$$M[a] = A/2, M[t_d] = T/2.$$

Среднее значение частоты изменения скоростных режимов (6а) равно:

$$M[f_{пчм}] = 1/T. \tag{7}$$

Пример: если $A = 2 \text{ м/с}^2$, $T = 60 \text{ с}$, $v_0 = 108 \text{ км/ч} = 30 \text{ м/с}$, $f_0 = 2,4 \text{ ГГц}$, то на основании формул (5), (6а), (6б), (7) получим:

$$M[f_d] = \frac{2,4 \cdot 10^9 \text{ Гц} \cdot 30 \text{ м/с}}{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} = 240 \text{ Гц};$$

$$M[f_{пчм}] = \frac{1}{60 \text{ с}} = 0,0167 \text{ Гц};$$

$$\Delta f_{пчм} \cong 2 \cdot M[f_d] = 480 \text{ Гц}.$$

Расчитанное значение $M[f_d]$, согласно опубликованным данным [4], окажет негативное влияние на качество радиосвязи, т.е. вызовет ошибки при приёме радиоимпульсов.

Таким образом, величина погрешности (искажений полезного сигнала) от действия ЭД $\delta_{эд}^2$ для полосы $\Delta f_{пч} = 2 \cdot 10^9 \cdot 1,3 = 2,6 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ (расчитанной по формуле (2а), где $\Delta F_\lambda = 10^9 \text{ Гц}$, $M = 0,3$ [8]), согласно формуле (3), равна:

$$\delta_{\varepsilon_{\text{ЭД}}}^2 = \frac{2 \cdot 480 \text{ Гц}}{2,6 \cdot 10^9 \text{ Гц}} = 369,23 \cdot 10^{-9} \cong 0,37 \cdot 10^{-6}.$$

Величина погрешности $\delta_{\varepsilon_{\text{ЭД}}}^2$ соизмерима с искажениями от действия внешних помех и других источников искажений [9].

Для уменьшения искажения за счёт действия ЭД в приёмниках предусматривается установка систем автоматической подстройки частоты (АПЧ) несущего сигнала.

Кроме смещения полосы частот принимаемого сигнала, действие ЭД может привести к искажениям за счёт ошибок синхронизации при когерентном приёме. В качестве примера можно рассмотреть случай движения приёмника радиосигналов навстречу передатчику со скоростью 120 км/ч (работа ведётся на частоте 2,5 ГГц с длительностью периода 400 пс). Смещение (увеличение) частоты в результате ЭД составит величину 275 Гц и вызовет уменьшение длительности сигнала примерно на 11 пс за счёт уменьшения периода несущей частоты [4]. Радиоимпульс как бы сжимается во времени. При этом количество периодов несущего сигнала за время длительности импульса и количество импульсов в единицу времени (скорость передачи сигналов) не изменятся. Однако сокращение длительности импульсов на 11 пс может привести к временному сдвигу τ входного радиоимпульса относительно опорного сигнала в когерентном приёмнике. В результате окончательное решение по поводу значения принятой цифры на фоне помех может быть ошибочным. Ошибка $\varepsilon(\tau)$ за счёт некогерентности сигналов скажется на величине меток многоканального приёмника на входе решающего устройства, которое после выбора максимальной метки определяет значение переданной цифры.

Длительность τ при фиксированном значении несущей частоты есть переменная величина, зависящая от скорости и направления движения объекта. На выходе каналов приёмника каждая метка представляет собой сумму сигнальной $g(\lambda)$ и помеховой $n(\lambda)$ составляющих значения коэффициента корреляции $R(\lambda)$, где λ означает переданный сигнал (цифру). В «своём канале» сигнальная составляющая максимальна, так как входной сигнал

соответствует опорному. В «чужом канале» $g(\lambda)$ равна нулю на основании принципа ортогональности [6]. При некогерентном приёме сигнальная составляющая в «своём канале» равна значению автокорреляционной функции $R_{\text{ав}}(\tau)$, которое меньше, чем величина функции при $\tau = 0$ $R_{\text{ав}}(0)$. В чужом канале $g(\lambda)$ равна значению функции взаимной корреляции $R_{\text{вз}}(\tau)$. Отсюда, ошибку в «своём канале» после деления на величину мощности сигнала $\sigma_{\lambda}^2 = \sigma_{\text{чм}}^2$ можно оценить как:

$$\varepsilon(\tau) = [1 - r_{\text{ав}}(\tau)],$$

где $r_{\text{ав}}(\tau)$ – нормированная функция автокорреляции переданного сигнала.

Нормированная функция автокорреляции для радиоимпульса имеет вид:

$$r(\tau) = \frac{\sin \omega \tau}{\omega \tau} [5].$$

При этом ω – круговая частота, соответствует частоте несущего сигнала. Учитывая, что несущая частота и временной сдвиг (уменьшение длительности импульса в результате действия ЭД) отличаются в рассмотренном выше примере на три порядка, величина искажений $g(\tau)$ (отклонения от максимального значения) составляет $\varepsilon(\tau) = (3 \cdot 10^{-5})\%$. Однако с увеличением скорости движения объектов погрешность за счёт некогерентности сигналов на входе приёмника будет возрастать.

Если зафиксировать скорость движения (например, $v_0 = 30$ м/с) и изменять только несущую частоту f_0 , то для $f_0 = 2,4$ ГГц частотный сдвиг в процентах на основании формулы (4) будет равен $(4,7 \cdot 10^{-2})\%$. С ростом значения несущей частоты сдвиг уменьшается в процентах. Так, для инфракрасного диапазона 400 ТГц, например, атмосферной (лазерной) связи частотный сдвиг составляет $(10^{-5})\%$. Это свидетельствует о том, что эффект Доплера наиболее опасен для радиодиапазона.

4. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ

Система автоматической подстройки частоты АПЧ устанавливается в усилителе промежуточной частоты УПЧ приёмника. Как отмечено выше, система АПЧ отслеживает изменения несущей частоты f_0 и производит её подстройку [5].



В основе оценки эффективности лежит сравнение величины приведённой суммарной дисперсии погрешности от действия ЭД с использованием АПЧ $\delta_{\text{АПЧ}}^2$ и без системы АПЧ $\delta_{\text{ЭД}}^2$.

Анализ приведённой суммарной дисперсии погрешности $\delta_{\text{ЭД}}^2$ и соответствующие расчётные формулы рассмотрены в предыдущих разделах.

Как отмечено выше, для анализа работы АПЧ можно представить эффект Доплера как паразитную частотную модуляцию ПЧМ, модулирующую полезный сигнал по закону изменения скорости движения поезда. Поэтому нужно оценить ширину полосы частот ПЧМ $\Delta f_{\text{ПЧМ}}$ по формуле (2б) [6].

Величина $\Delta f_{\text{ПЧМ}}$ показывает возможный диапазон изменений частоты девиации $f_{\text{д}}$ (рис. 2). Наряду с полосой $\Delta f_{\text{ПЧМ}}$ целесообразно ввести понятие мгновенного спектра $\Delta f_{\text{МГН}}$ [6], который характеризует динамику изменения частоты $f_{\text{д}}$. Это позволит по-другому сформулировать задачу АПЧ.

Цель системы АПЧ – отслеживать изменения несущей частоты f_0 в полосе мгновенного спектра паразитной частотной модуляции, равной:

$$\Delta f_{\text{МГН}} = 2 \cdot M[f_{\text{ПЧМ}}]. \quad (8)$$

Принцип работы АПЧ можно описать следующим образом. Управляющий сигнал $\lambda(t)$ с выхода частотного детектора (рис. 3) поступает на управляющий элемент, например, варикап в нагрузке гетеродина или частотно-модулируемого генератора (ЧМГ) и изменяет частоту выходного синусоидального сигнала ЧМГ в соответствии с изменениями входного сигнала, происходящими за счёт ЭД. В смесителе происходит сравнение частот двух сигналов. Погрешность $\delta_{\text{АПЧ}}^2$ при использовании системы АПЧ будет определяться величиной $\Delta f_{\text{МГН}}$ (полосой удержания) [5]. Главным элементом в системе АПЧ является управляющий элемент (управитель), а именно: полупроводниковый диод, у которого барьерная ёмкость p - n перехода зависит от приложенного обратного напряжения. Быстродействие этого элемента (скорость изменения ёмкости закрытого перехода варикапа от приложенного к нему запирающего напряжения $\lambda(t)$) непосредственно влияет на качество подстройки частоты входного сигнала.

Таким образом, эффективность системы АПЧ определяется скоростью отслеживания изменений амплитуды управляющего сигнала, зависящей от величин ускорения a и частоты смены скоростных режимов (или продолжительности $t_{\text{д}}$). Быстродействие управляющего элемента определяется электронными характеристиками материала (например, эффективной массой электрона, чистотой исходного химического элемента, размерами полупроводникового кристалла) [9].

Значение эффективной полосы частот сигнала, равное величине $\Delta f_{\text{УПЧ}}$, рассчитывается по формуле (2а), представленной выше.

Величина приведённой суммарной дисперсии погрешности от действия ЭД для приёмников с системой АПЧ, согласно выражениям (1), (3), определяется следующим образом:

$$\delta_{\text{АПЧ}}^2 = \frac{2 \cdot \Delta f_{\text{МГН}}}{\Delta f_{\text{УПЧ}}}. \quad (9)$$

На основании уже принятых выше значений $M[f_{\text{ПЧМ}}] = \frac{1}{60\text{с}} = 0,0167\text{Гц}$ (7) и $\Delta f_{\text{УПЧ}} =$

$2,6 \cdot 10^9\text{Гц}$ (2а) можно оценить ширину мгновенного спектра $\Delta f_{\text{МГН}}$ и приведённую суммарную погрешность $\delta_{\text{АПЧ}}^2$.

Так, на основании формулы (8) ширина мгновенного спектра ПЧМ равна $\Delta f_{\text{МГН}} = 2(1/60\text{с})$ (8), что означает изменение режимов движения в среднем через 60 с.

Значение погрешности $\delta_{\text{АПЧ}}^2$ с учётом действия системы АПЧ равно:

$$\delta_{\text{АПЧ}}^2 = \frac{2 \cdot 2 \cdot 0,0167}{2,6 \cdot 10^9} = 0,257 \cdot 10^{-10}.$$

Величина приведённой суммарной дисперсии погрешности без системы АПЧ (рассчитанная в предыдущем параграфе) равна $\delta_{\text{ЭД}}^2 = 0,37 \cdot 10^{-6}$.

Отсюда, система АПЧ позволяет уменьшить погрешность от действия ЭД на четыре порядка. Сравнение расчётов по формулам (3) и (9) показывает, что улучшение качества сигнала происходит за счёт значительно меньшей ширины полосы частот мгновенного спектра по сравнению с шириной полосы ПЧМ, а именно: $\Delta f_{\text{МГН}} \ll \Delta f_{\text{ПЧМ}}$.

Влияние ЭД можно также оценить с помощью вероятности ошибки при приёме элементарного импульса $P_{\text{ош}}$ за счёт сдвига полосы частот канала. Для оцифрованных первичных сигналов с нормальным зако-

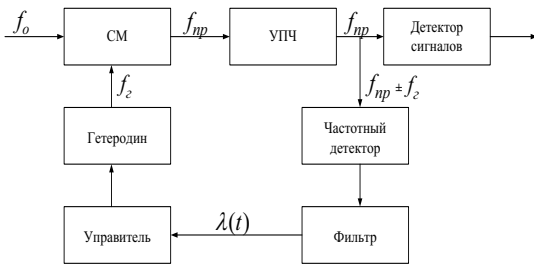


Рис. 3. Схема автоподстройки частоты ($f_{np} \pm f_d$) за счет формирования управляющего напряжения $\lambda(t)$ и ЧМГ [5], где СМ – смеситель; УПЧ – усилитель промежуточной частоты; f_c – частота гетеродина (ЧМГ); f_{np} – промежуточная частота; f_d – девиация частоты.

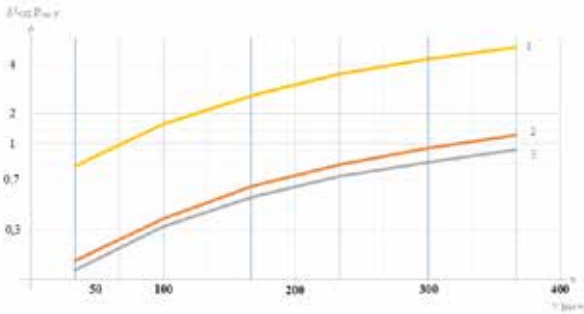


Рис. 4. Зависимости погрешности $\delta^2 \varepsilon_{эд}$ ($\times 10^{-6}$), вероятности ошибки $P_{ош}$ ($\times 10^{-7}$), эффективности АПЧ γ ($\times 10^{-2}$) от скорости движения поезда v [1 – γ , 2 – $\delta^2 \varepsilon_{эд}$, 3 – $P_{ош}$].

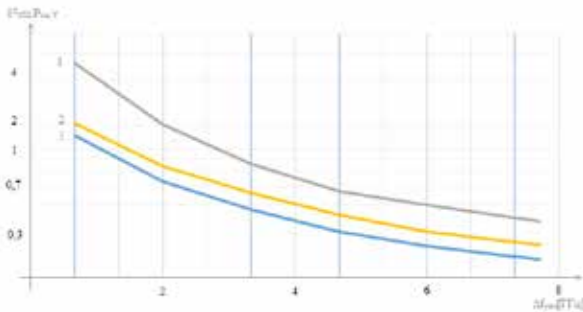


Рис. 5. Зависимости погрешностей $\delta^2 \varepsilon_{эд}$ ($\times 10^{-6}$), $\delta^2 \varepsilon_{апч}$ ($\times 10^{-10}$) и вероятности ошибки $P_{ош\text{АПЧ}}$ ($\times 10^{-11}$) от ширины полосы $\Delta f_{упч}$ [1 – $\delta^2 \varepsilon_{эд}$, 2 – $\delta^2 \varepsilon_{апч}$, 3 – $P_{ош\text{АПЧ}}$].

ном распределения плотности вероятностей (например, голос, видеоизображение) вероятность $P_{ош}$ можно рассчитать следующим образом [6]:

$$P_{ош} \cong \delta^2 \varepsilon_{эд} / 12. \quad (10)$$

Отсюда, выигрыш в качестве связи γ за счёт применения АПЧ составит:

$$\gamma = \frac{P_{ош}}{P_{ош\text{АПЧ}}} = \frac{0,37 \cdot 10^{-6}}{0,257 \cdot 10^{-10}} = 1,44 \cdot 10^4.$$

Уменьшение вероятности ошибки на четыре порядка свидетельствует о высокой эффективности системы АПЧ в борьбе с эффектом Доплера.

Характер влияния скорости движения поезда v и полосы частот сигнала $\Delta f_{упч}$ на величину приведённой дисперсии суммарной погрешности, вероятности ошибки и эффективность АПЧ представлен на рис. 4, 5.

Как видно из рис. 4, с ростом скорости движения поезда искажения от эффекта

Доплера увеличиваются, эффективность использования АПЧ повышается.

Как видно из рис. 5, увеличение скорости передачи сигналов (расширение полосы частот $\Delta f_{упч}$) снижает величину погрешностей $\delta^2 \varepsilon_{эд}$ и $\delta^2 \varepsilon_{апч}$, а также вероятность ошибки $P_{ош\text{АПЧ}}$. Согласно формулам (3) и (9), увеличение $\Delta f_{упч}$ не влияет на эффективность работы автоматической подстройки частоты. Эффективность АПЧ не меняется и при скорости движения поезда $v = 108$ км/ч равна $\gamma = 1,44 \cdot 10^4$. Однако в представленных расчётах не учитывается время задержки в петле обратной связи АПЧ, которое должно быть значительно меньше, чем длительность элементарного импульса, зависящая от скорости передачи сигналов. Рассчитанные значения вероятностей $P_{ош}$ с помощью аналитических формул (рис. 1, 2) дают результаты, которые на порядок лучше, чем полученные экспериментальным путём [1; 2]. Это можно объяснить тем, что



в исходных выражениях (1)–(3); (9); (10) не учитывается сложная электромагнитная обстановка на железнодорожном транспорте. Так, в реальных условиях кроме эффекта Доплера на качество сигналов влияют интермодуляционные помехи различного происхождения.

Известно, что в реализации системы АПЧ главное – установление режима захвата полосы частот $\Delta f_{\text{мгн}}$ и обеспечение удержания этой полосы. Это во многом зависит от инерционности и быстродействия элементной базы электроники, с помощью которой реализуется система АПЧ, а именно, от использования полупроводниковых материалов нового поколения на основе наноструктур [9].

5. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ЭФФЕКТА ДОПЛера

Анализ особенностей влияния эффекта Доплера на качество радиосвязи в условиях высокоскоростного движения позволяет сделать следующие выводы:

1. Эффект Доплера оказывает негативное влияние на качество связи при скоростях движения поезда более 100 км/ч. При этом значение приведённой суммарной дисперсии погрешности сигнала от действия эффекта Доплера по величине соизмеримо с действием внешних помех.

2. Эффективность борьбы с эффектом Доплера определяет в условиях железнодорожного транспорта качество связи подвижных объектов в сетях мобильной связи и Wi-Fi. Особенно это касается процесса передачи обслуживания абонента во время вызова от одной базовой станции (БС) к другой.

3. Скорость переключения с одной БС на другую (режим «мягкого хэндовера») зависит от скорости передачи информации и быстродействия элементной базы микроэлектроники, определяющей также эффективность борьбы с эффектом Доплера.

4. Чем выше стандарт мобильной связи, тем выше скорость передачи информации, тем жёстче требования к быстродействию системных блоков, контроллеров, коммутаторов доступа сетей мобильной связи, а также систем АПЧ приёмника.

5. В условиях высокоскоростного движения передача информации в кабину машиниста поезда может осуществляться с помощью мобильной связи стандарта 4G, обладающего более совершенными технологиями обмена данными между пользователями и базовой станцией, сетевыми протоколами, алгоритмами управления мобильностью абонентов в сети, методами борьбы с помехами, возникающими, в том числе, из-за действия эффекта Доплера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Current and future usage of railway radio communication systems between train and trackside. Report ITU-R M.2442-0 (11/2018). ITU, 2019 [Электронный ресурс]: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2442-2019-PDF-E.pdf. Доступ 14.06.2020.
2. Trinh Thi Huong, Nguyen Manh Dat, To Thi Thao, Nguyen Duy Viet, Vu Van Yem. Compensating Doppler Frequency Shift of High Speed Rail Communications. *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 13, No. 17 (2018), pp. 13344–13348. [Электронный ресурс]: https://www.ripublication.com/ijaer18/ijaerv13n17_52.pdf. Доступ 14.06.2020.
3. Эффект Доплера в сетях: GSM, 3G, 4G. [Электронный ресурс]: <https://m.habr.com/ru/post/131248>. Доступ 14.06.2020.
4. Майков Д. Ю., Вершинин А. С. Влияние эффекта Доплера на OFDM-сигнал // Молодой учёный. – 2014. – № 21. – С. 175–179. [Электронный ресурс]: <https://moluch.ru/archive/80/pdf/>. Доступ 14.06.2020.
5. Васильев Д. В., Витоль М. Р., Горшенков Ю. Н. и др. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Радио и связь, 1982. – 528 с. [Электронный ресурс]: <http://narod.ru/disk/25746386000/Samoilo.djvu.html>. Доступ 14.06.2020.
6. Горелов Г. В., Фомина А. Ф., Волков А. А., Котов В. К. Теория передачи сигналов на железнодорожном транспорте. – М.: Транспорт, 2001. – 415 с. [Электронный ресурс]: <https://b-ok.global/dl/2900707/123b8a/>. Доступ 14.06.2020.
7. Эффект Доплера. [Электронный ресурс]: <http://light-science.ru/fizika/effekt-doplera.html>. Доступ 14.06.2020.
8. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Прикладные задачи теории вероятностей. – М.: Радио и связь, 1983. – 414 с. [Электронный ресурс]: <https://booksee.org/dl/771222/83fae2>. Доступ 14.06.2020.
9. Плеханов В. Г., Журавлёва Л. М. Изотопическое создание полупроводникового графена // Нанотехника. – 2012. – № 3. – С. 34–39. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18227204>. Доступ 14.06.2020.
10. Громаков Ю. А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи. – М.: Эко-Трендз, 2000. – 239 с. [Электронный ресурс]: <http://computersbooks.net/books/web-programmirovaniye/gromakov-ua/1997/files/standartiisistem1997.djvu>. Доступ 14.06.2020.
11. Журавлёва Л. М., Курьянцев Д. Г., Лошкарев В. Л., Левшунов В. В. Оценка влияния радиоканала на качество видеосигнала систем видеонаблюдения на железнодорожном транспорте // Проектирование и технология электронных средств. – 2019. – № 3. – С. 34–39. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42574104>. Доступ 14.06.2020.