

М-последовательности, полученные на базе других конфигураций регистра зсува (при $n=\text{const}$). Досі на базі регістра зсуву, що містить 5 елементів ($n=5$), розглядалась конфігурація, описана (рис. 2) формуючим поліномом $[5 \ 3 \ 0]$. Але на базі регістра зсуву при $n=5$ можна утворити інші конфігурації, які описуються, наприклад, формуючими поліномами : $[5 \ 4 \ 3 \ 2 \ 0]$; $[5 \ 4 \ 3 \ 1 \ 0]$; $[5 \ 4 \ 2 \ 1 \ 0]$; $[5 \ 3 \ 2 \ 1 \ 0]$ і т.д. Нижче наведено дані для формуючого полінома $[5 \ 2 \ 0]$.

Отже, подана методика базується на методі $2D-3D-2D'$ [4], компактного представлення інформації про всі можливі варіанти m -последовательностей, отриманих на базі регістра зсуву (рис. 1) при заданих:

- кількості елементів n у складі регістра;
- даних про підключення (непідключення) кожного елемента регістра до коло зворотного зв'язку;
- початкових станах вихідних сигналів кожного елемента регістра.

1. Волков Л.Н., Немировский М.С., Шинаков Ю.С. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: учеб. пособие =. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 392 с. 2. Беспроводные линии связи и сети: пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 640 с. 3. Ипатов В. Широкополосные системы и кодовое разделение каналов. Принципы и приложения. – М.: Техносфера, 2007. – 488 с. 4. Климаш М.М., Пелишок В.О. Проектирование эффективных систем беспроводного зв'язку. – Львів, 2010. – 232 с.

УДК 621.391

А.К. Сундучков, М.В. Поляков, К.С. Сундучков

GlobalLogic

Институт телекоммуникационных систем НТУУ “КПИ”

ОЦЕНКА МЕЖКАНАЛЬНЫХ ПОМЕХ ПРИ ВЛИЯНИИ ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА

© Сундучков А.К., Поляков М.В., Сундучков К.С., 2012

Приведена математическая модель для расчета степени влияния эффекта Доплера, при скорости движения мобильного терминала со скоростью 40–3000 км/ч, на межканальные помехи, обусловленные отличием частоты сигнала информационного канала, принятого приемником мобильного терминала, от частоты информационного сигнала, излученного передатчиком. Вычислены отношения уровня мощности сигнала информационного канала к уровню мощности шумов, обусловленных влиянием сигналов в соседних каналах.

Ключевые слова: частота сигнала, передатчик.

The article contains a mathematical model of calculation the degree of Doppler effect influence with the mobile terminal velocity at a rate of 40–3000 km/h on the interchannel interference and interference caused by frequency difference of signal information channel, that was received received by the mobile terminal and frequency of information signal that was emitted by the transmitter. In the article was calculated the level of signal strength of the information channel to the level of the noise power due to the influence of signals in adjacent channels.

Key words: information channel, transmitter.

Введение. При формировании и передаче сообщений с помощью OFDM могут возникнуть осложнения при приеме сигнала, связанные с расстройкой частот поднесущих относительно номинальных. Этот эффект могут вызывать такого рода явления, как нестабильность генерации частот поднесущих, частотная расстройка при приеме сообщений, а также эффект Доплера.

Оценка межканальных помех (МКП) для низкоскоростных сигналов осуществлена в работе [1]. В этой работе сделана попытка провести расчет степени влияния подканалов друг на друга при воздействии эффекта Доплера.

Математическая модель. Рассмотрим влияние эффекта расстройки частоты поднесущих. В качестве допущения возьмем условие, что передаваемый сигнал имеет один луч распространения и не имеет аддитивного шума. В общем виде сформированный OFDM сигнал представляет собой:

$$S(t) = \sum_{k=0}^{N-1} U_k \cos\left(2p \left[f_{0t} + \left(k - \frac{N-1}{2}\right) \Delta f \right] t + j_k\right), \quad (1)$$

где U_k – амплитуда k -й поднесущей, f_{0t} – центральная частота переданного сигнала, N – количество поднесущих, Δf – частотный интервал между поднесущими, j_k – фаза k -й поднесущей.

При приеме такого сигнала, для того чтобы перенести его в область нижних частот для последующей демодуляции, сигнал проходит через квадратурное преобразование. Это значит, что в первой ветке пришедший сигнал домножается на множитель $\cos(2p f_{0r} t)$, а во второй ветке он домножается на множитель $\sin(2p f_{0r} t)$, после чего идет на фильтр нижних частот, который отсекает высокочастотные составляющие.

На выходе первого перемножителя сигнал имеет вид:

$$S(t) \cdot \cos(2p f_{0r} t) = \sum_{k=0}^{N-1} U_k \cos\left(2p \left[f_{0t} + \left(k - \frac{N-1}{2}\right) \Delta f \right] t + j_k\right) \cdot \cos(2p f_{0r} t) \quad (2)$$

После прохождения через фильтр нижних частот высокочастотная часть сигнала отсекается, таким образом, принятый сигнал преобразуется в вид:

$$S_{ri}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} U_k \cos\left(2p \left[f_{0t} - f_{0r} + \left(k - \frac{N-1}{2}\right) \Delta f \right] t + j_k\right) \quad (3)$$

На выходе второго перемножителя и после прохождения фильтра нижних частот сигнал принимает такой вид:

$$S_{rq}(t) = -\frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} U_k \sin\left(2p \left[f_{0t} - f_{0r} + \left(k - \frac{N-1}{2}\right) \Delta f \right] t + j_k\right) \quad (4)$$

После перемножителей сигналы подаются на АЦП и подвергаются цифровой обработке и демодуляции.

Как видно из изложенного выше, расстройка по частоте между приемником и передатчиком приводит к сдвигу спектра сигнала на величину $df = f_{0t} - f_{0r}$, что в свою очередь может привести к ошибочному приему сигнала. При эффекте Доплера величина расстройки зависит от частоты и связана соотношением:

$$df(f_{0t}) = f_{0t} - f_{0r} = f_{0t} - \frac{f_{0t}}{1 - \frac{V}{C}} = -f_{0t} \frac{V}{C - V} \quad (5)$$

При формировании сигнала отсчеты сигнала, получаемые при взятии ОБПФ от комплексной последовательности данных, имеют вид:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S_k e^{j \frac{2p}{N} kn} \quad (6)$$

При приеме, из-за эффекта Доплера, исходный сигнал получает сдвиг по частоте df , что эквивалентно такому выражению:

$$r(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S_k e^{j \frac{2p}{N} kn} e^{j 2p \cdot df(f_{0t}) \cdot n T_s} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S_k e^{j \frac{2p}{N} n(k + df(f_{0t}) \cdot N \cdot T_s)} \quad (7)$$

Сдвиг по фазе зависит от частоты и времени, а также обозначает поворот плоскости сигнального созвездия. Таким образом, сигнал может подвергнуться существенным фазовым искажениям, что приведет к неправильному приему сообщения.

Демодуляция OFDM сигнала осуществляется путем применения БПФ – прямого быстрого преобразования Фурье. После демодуляции общий вид сигнала принимает такой вид:

$$y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} r(n)e^{-j\frac{2p}{N}kn} = \sum_{n=0}^{N-1} \left[\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S_k e^{j\frac{2p}{N}n(k+df(f_{0r}) \cdot N \cdot T_s)} \right] e^{-j\frac{2p}{N}kn} \quad (8)$$

В [1] сказано, что это выражение можно привести к виду:

$$y(k) = S_k \cdot \frac{\sin(pN \cdot df(f_{0r}) \cdot T_s)}{N \cdot \sin(p \cdot df(f_{0r}) \cdot T_s)} e^{jp \cdot df(f_{0r}) \cdot T_s \cdot (N-1)} + \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq k}}^{N-1} S_l \cdot \frac{\sin(pN \cdot df(f_{0r}) \cdot T_s)}{N \cdot \sin(p \cdot \left[\frac{l-k}{N} + df(f_{0r}) \cdot T_s \right])} e^{jp \cdot \left[df(f_{0r}) \cdot T_s \cdot (N-1) + \frac{k-l}{N} \right]} \quad (9)$$

Модель уточнена тем, что в ней в явной форме приведена зависимость от влияния эффекта Доплера.

Первое слагаемое описывает влияние сдвига частоты информационного канала самого на себя. Остальные слагаемые описывают влияние соседних поднесущих на информационный канал.

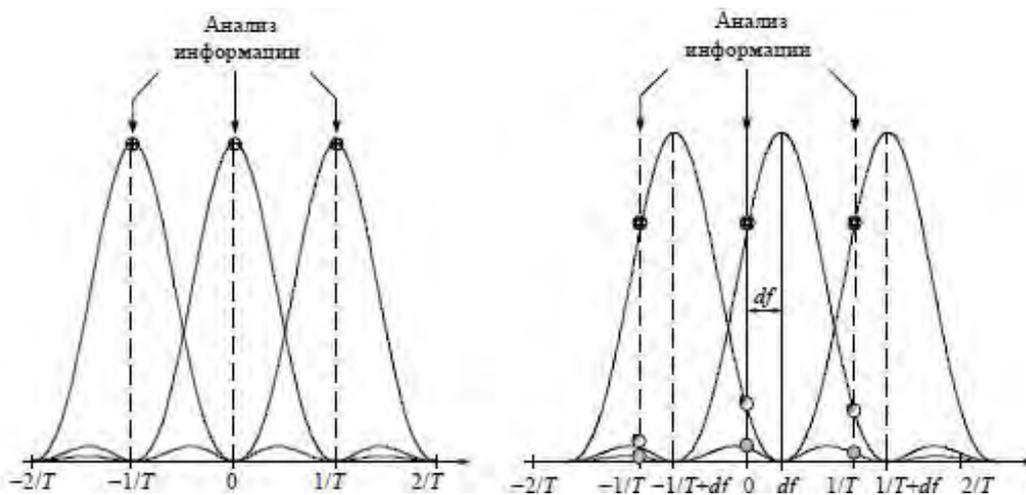


Рис. 1. Анализ группового сигнала OFDM: а – при отсутствии частотного сдвига; б – при наличии частотного сдвига

Приемник без автоматической подстройки частоты гетеродина. Подсчитаем влияние информационного подканала, соседних подканалов и суммарное влияние информационного и соседнего подканалов на информационный канал при учете эффекта Доплера.

В качестве примера возьмем сигнал OFDM с начальной частотой $F_n=4.5$ ГГц, частотным сдвигом $\Delta F = 7$ МГц, модуляцией QAM-64. Для упрощения задачи принято, что в каждом подканале передается символ с параметрами модуляции $I=3$ мВ, $Q=4$ мВ. Таким образом, для всех подканалов

$$S_k = \sqrt{I^2 + Q^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ мВ}. \quad (10)$$

Результаты вычислений, проведенных с помощью программного обеспечения Mathcad, для зависимостей величин мощностей откликов при демодуляции сигнала для внешнего, внутреннего и суммарного влияния составляющих OFDM сигнала приведены на графиках. В качестве количества поднесущих выбраны значения 256, 1024, 2048. Скорость изменялась в пределах 40–3000 км/ч и 40–300 км/ч, что соответствует на последующих рисунках обозначениям а и б.

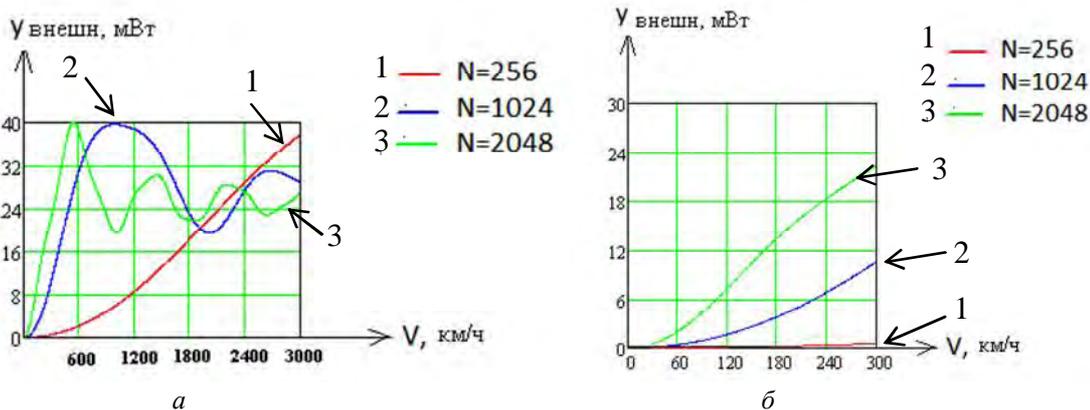


Рис. 2. Зависимость мощности отклика, который вносят соседние поднесущие, от скорости движения терминала

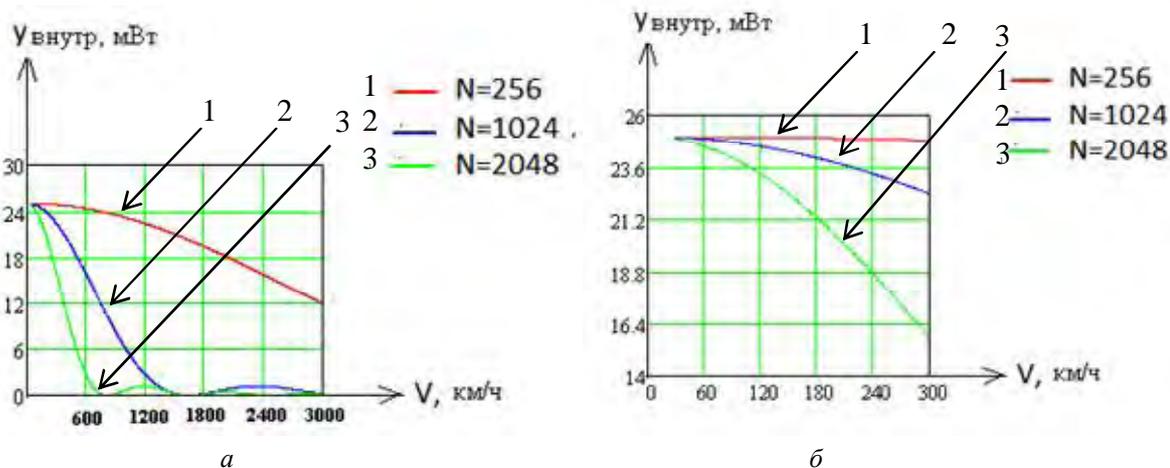


Рис. 3. Зависимость мощности отклика в информационном канале с учетом помех, обусловленных эффектом Доплера, от скорости движения терминала

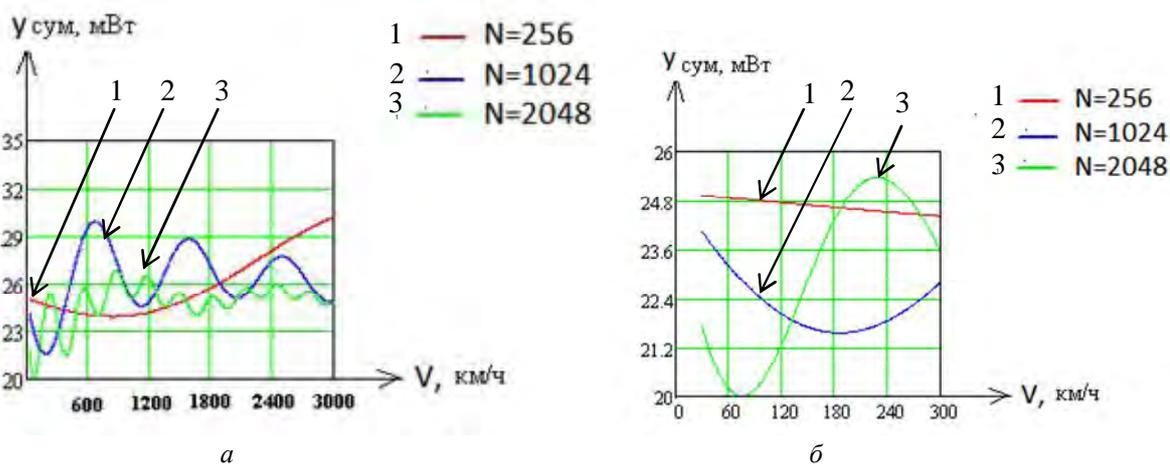


Рис. 4. Зависимость суммарной мощности отклика, с учетом помех в информационном канале, от скорости движения терминала

Как видно из этих зависимостей, на демодуляцию сигнала, при наличии эффекта Доплера, влияют как соседние поднесущие, так и сам информационный канал на себя. На результат это сильно влияет. Величина отклика колеблется в зависимости от скорости движения терминала. Суммарный отклик не равен сумме модулей откликов на внутренний канал и на внешние каналы,

он равен сумме перечисленных выше откликов с учетом их фазы. Потому суммарный отклик нельзя получить, просто сложив модули внешнего и внутреннего откликов.

На промежутке до 300 км/ч наименьшее влияние помех достигается при использовании 256 поднесущих, а также на интервале 180–260 км/ч при использовании 2048 поднесущих.

Вычислим соотношение мощности полезного отклика к шумам. Для этого допустим, что полезный сигнал передавался с мощностью, равной 25 мВт. Тогда выражения для расчета соотношения сигнал/шум будет выглядеть так:

$$\frac{C}{\Pi} = \frac{25}{U_{\text{сум}} - 25}. \quad (11)$$

Результаты вычислений для соотношения сигнал/шум в канале от скорости движения терминала приведены ниже.

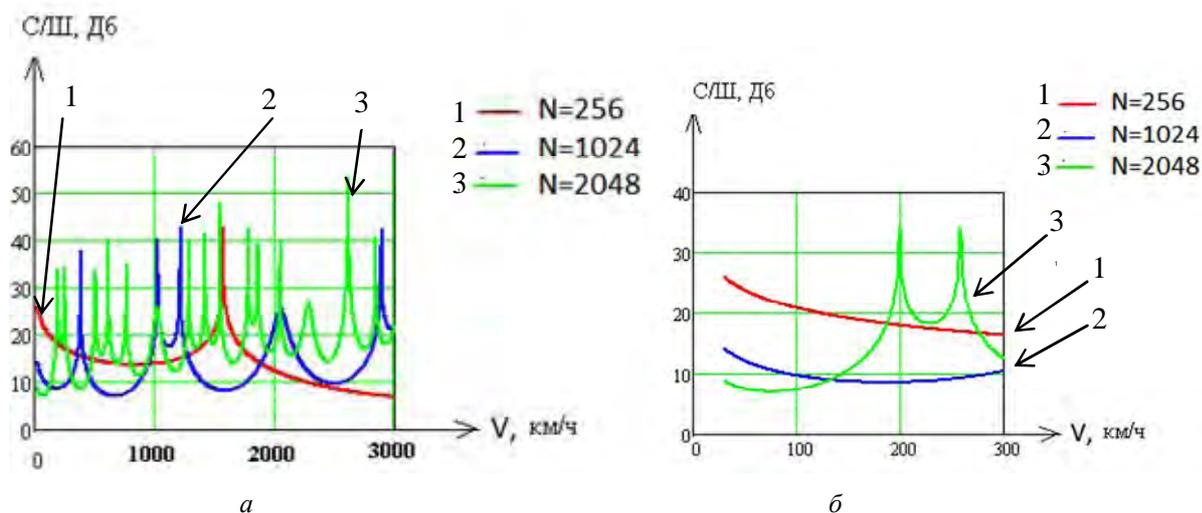


Рис. 5. Зависимость отношения С/Ш, который вносит эффект Доплера, от скорости движения терминала

Как видно, соотношение сигнал/помеха сильно зависит от скорости движения терминала. Пики соотношения С/Ш обусловлены тем, что при некоторых скоростях суммарный отклик равен ровно 25 мВт, то есть выходит, что, казалось бы, лишний отклик на соседние поднесущие играет положительную роль, компенсируя отклик на внутренний канал.

На рис. 5, б наилучшее соотношение сигнал/шум достигается при скорости движения 200 и 260 км/ч при условии использования 2048 поднесущих. При скорости до 300 км/час при использовании 256 поднесущих достигается отношение С/Ш выше 18 дБ.

Приемник с автоматической подстройкой частоты гетеродина. В качестве исходных условий возьмем то, что приемник может измерять скорость своего сближения со станцией. Это означает, что приемник может подстроить свой сигнал гетеродина с учетом доплеровского сдвига. Положим, что подстройка осуществляется относительно центра спектра сигнала OFDM.

Тогда величина расстройки частоты принятого сигнала будет такой:

$$df(f_{or}) = f_{or} - f_{0r} = -(f_{or} \frac{V}{C-V} - f_{0md} \frac{V}{C-V}) = (f_{0md} - f_{or}) \cdot \frac{V}{C-V} \quad (12)$$

Результаты вычислений для зависимостей величин мощностей откликов при демодуляции сигнала для внешнего, внутреннего и суммарного влияния составляющих OFDM сигнала при условии наличия подстройки частоты приемника базовой станции приведены на графиках. В качестве количества поднесущих были выбраны значения 256, 1024, 2048. Скорость изменялась в пределах 40–3000 км/ч.

Поскольку за расчетное бралось влияние эффекта Доплера на центральный канал и подстройка также производилась относительно центрального подканала, то величина отклика при демодуляции центрального подканала не зависит от эффекта Доплера и равна 25 мВт. На

скоростях до 300 км/час лучше всего использовать 256 поднесущих, поскольку при их использовании суммарный отклик почти не изменяется и равен приблизительно 25 мВт.

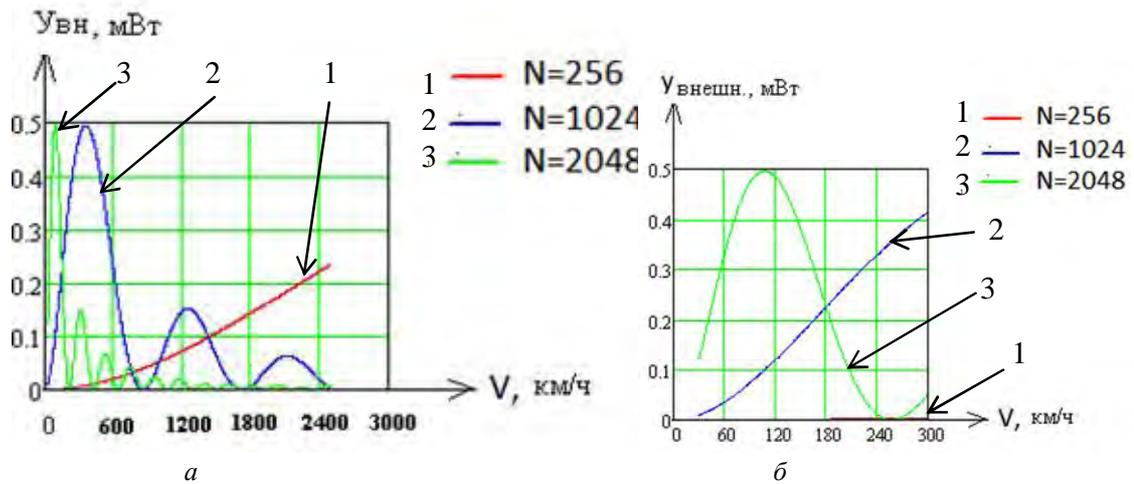


Рис. 6. Зависимость мощности отклика, который вносят соседние поднесущие, от скорости движения терминала

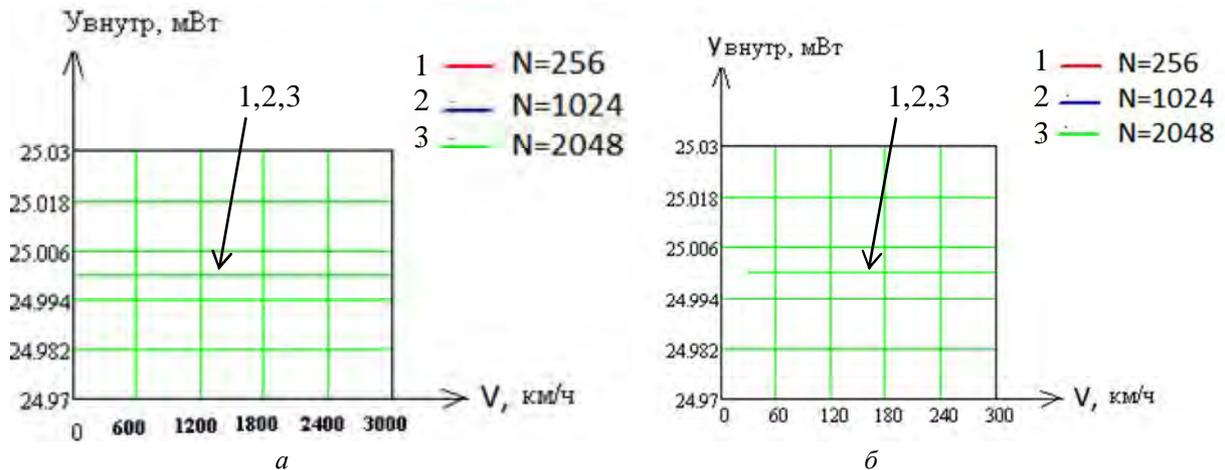


Рис. 7. Зависимость мощности отклика в информационном канале с учетом помех, обусловленных эффектом Доплера, от скорости движения терминала

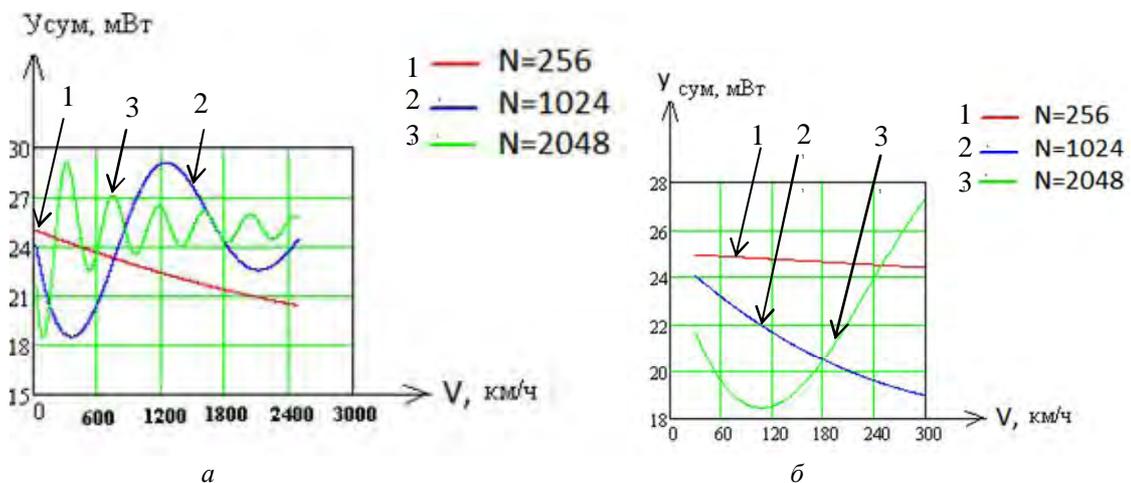


Рис. 8. Зависимость суммарной мощности отклика, с учетом помех в информационном канале, от скорости движения терминала

Результаты вычислений для соотношения сигнал/шум в канале от скорости движения терминала приведены ниже.

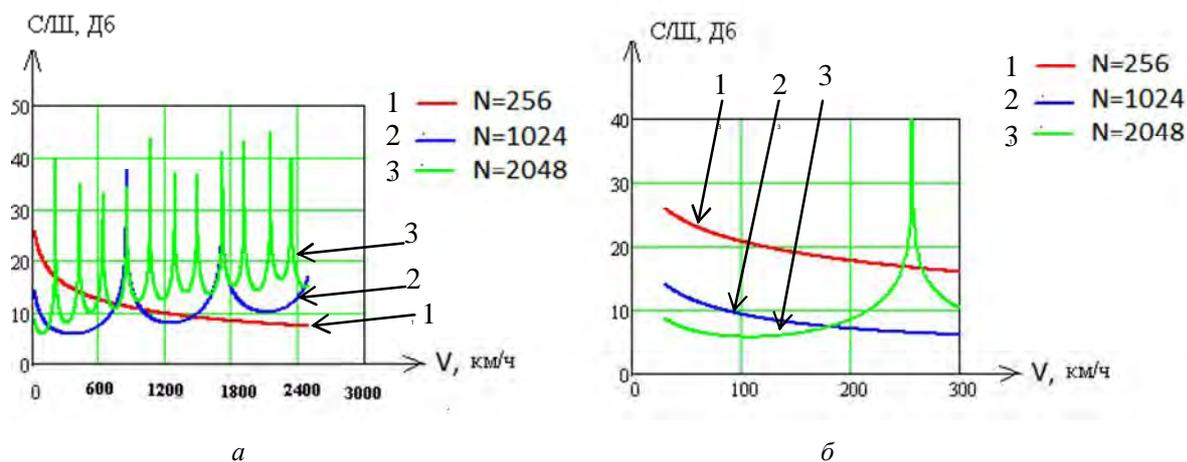


Рис. 9. Зависимость изменения отношения С/Ш, который вносит эффект Доплера, от скорости движения терминала

Как видно, в диапазоне скоростей 40–300 км/ч наилучший прием достигается при использовании 2048 поднесущих и скорости 260 км/ч. Однако более стабильно использовать 256 поднесущих, на всем интервале скоростей до 300 км/ч, отклик канала при использовании 256 поднесущих не меньше 18 дБ.

Если сравнить графики откликов демодулятора при наличии подстройки частоты гетеродина базовой станции и без подстройки его, можно прийти к выводу, что подстройка гетеродина улучшает на 3-4 дБ С/Ш при приеме сигнала. Однако существуют точки, где отклик сигнала близок к идеальному. Это обусловлено тем, что при сложении внешняя и внутренняя составляющие компенсируют ошибки друг друга. При скоростях до 300 км/час такие места наблюдаются при использовании 2048 поднесущих и скоростях 200 и 260 км/ч без использования автоподстройки частоты и скорости 260 км/ч при использовании автоподстройки частоты.

Выводы. В работе представлена математическая модель, отражающая обработку принятого сигнала при квадратурном преобразовании частот, фильтрации и до демодуляции включительно, которая осуществляется путем применения прямого быстрого преобразования Фурье.

С помощью указанной модели рассчитана степень влияния нарушения ортогональности поднесущих частот в OFDM символе, обусловленного эффектом Доплера, при движении мобильного терминала со скоростью от 40 до 3000 км/ч. Показано, что суммарный отклик равен сумме откликов всех поднесущих во всех каналах, включая интересующий нас информационный канал, с учетом фаз сигналов. Отсюда на графиках кривые имеют несколько максимумов и минимумов. Меньшее влияние помех проявляется при меньшем количестве поднесущих в OFDM-символе. При большом количестве поднесущих в OFDM-символе фазовые соотношения в сигналах приводят при разных скоростях движения мобильного терминала к большим перепадам откликов. Исследование соотношения сигнал/шум (С/Ш) при обозначенных параметрах сигнала показало, что при количестве поднесущих в OFDM-символе до 256 уменьшается отношение С/Ш с 27 дБ до 18 дБ с ростом скорости движения мобильного терминала от 40 до 300 км/ч.

1. Казанцев А.А. Проблема частотной синхронизации в системах со многими поднесущими // Вестник Государственного ижевского университета, 2006. 2. Беркман Л.Н., Щербина И.С., Чумак О.И., Рудык Л.В. Многоканальные модемы: монография / под науч. редакцией С.Е. Захаренка. – К.: Связь, 2006, 149 с. 3. Сундучков А.К., Остролицкая Е.А., Фадеева Е.А., Сундучков К.С. Междуканальная интерференция и метод оценки ее влияния на прием сигнала // Электроника и связь, тематический выпуск “Электроника и нанотехнологии”. – 2010. – С. 202–206.