

О ВЛИЯНИИ ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА НА РАБОТУ МОДЕМОВ СИГНАЛОВ OFDM

Тяжеев А.И.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: a.tyagev@psuti.ru

В статье анализируется влияние на работу модемов сигналов OFDM в радиоканалах, в которых происходит смещение спектра принимаемого сигнала за счет эффекта Доплера, возникающего вследствие взаимного перемещения в пространстве передатчика и приемника сигналов. По результатам анализа показано, что эффект Доплера оказывает негативное влияние на работу модемов сигналов OFDM и значительно снижает помехоустойчивость демодуляторов OFDM вплоть до нарушения передачи сообщений при превышении частотного сдвига выше порогового значения. Для устранения негативных последствий влияния эффекта Доплера на работу модемов в статье предлагаются меры по снижению и устранению влияния эффекта Доплера на работу модемов. В качестве таких мер предлагается использовать системы автоматической подстройки частоты, системы фазовой автоподстройки и системы синхронизации генераторов в демодуляторах сигналов OFDM, использующие для этого опорные поднесущие в сигналах OFDM.

Ключевые слова: сигналы OFDM, модемы сигналов OFDM на основе косинусно-синусных генераторов и на основе ДПФ, влияние эффекта Доплера на работу модемов сигналов OFDM, пороговые значения эффекта Доплера, устранение влияния эффекта Доплера на работу модемов сигналов OFDM

Введение

Модемы сигналов с использованием ортогональных поднесущих OFDM (Orthogonal Frequency-Division Modulation) находят широкое применение в различных системах передачи цифровых сообщений по радиоканалам (цифровое телевидение, спутниковая связь и т.д.). Скорость передачи сообщений у модемов сигналов OFDM значительно выше, чем у модемов, использующих другие виды модуляции сигналов [1; 2; 3]. В работах [4; 5] рассмотрены вопросы влияния на работу модемов сигналов OFDM условий распространения сигналов OFDM в радиоканалах с многолучевостью и замираниями сигналов. В данной статье проводится анализ влияния на работу модемов сигналов OFDM эффекта Доплера. Этот эффект проявляется при взаимном перемещении передатчика и приемника в пространстве на скоростях, при которых происходит смещение частотного спектра принимаемого сигнала OFDM. По результатам анализа приводятся количественные оценки влияния эффекта Доплера на работу модемов сигналов OFDM и даются рекомендации по уменьшению и устранению влияния этого эффекта на работу таких модемов.

Принципы построения модуляторов OFDM

В модемах OFDM в радиоканале с полосой Π размещают N ортогональных поднесущих, разнес между поднесущими $F_p = 1/T$, где T – интервал ортогональности, равный длительности передачи варианта сообщения на k -ой поднесущей с частотой:

$$f_k = f_0 + kF_p,$$

где f_0 – нижняя частота спектра сигнала OFDM;
 $k = 0, 1, 2, 3 \dots N-1$ – номера поднесущих частот.

Каждая поднесущая может быть сформирована в действительном или в комплексном виде (в квадратуре). В действительном виде это одна компонента (синусоида или косинусоида), в комплексном виде это две компоненты (синусоида и косинусоида). Генератор k -ой поднесущей в комплексном виде будем называть косинусно-синусным генератором (КСГ). Отметим, что синусоида и косинусоида одной частоты являются ортогональными функциями на длительности периода этих функций.

При действительном виде поднесущей применяется относительная фазовая модуляция этой поднесущей за счет изменения фазы сигнала на угол π на очередном временном интервале T по отношению к предыдущему временному интервалу (ОФМ-1). При комплексном виде поднесущей применяется относительная фазовая модуляция обеих компонент на угол π , называемая квадратурной относительной фазовой модуляцией (ОФМ-2).

При балансной амплитудной модуляции обеих компонент поднесущей суммарный сигнал двух модулированных по амплитуде квадратурных компонент представляет собой сигнал с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ). В зависимости от возможного числа уровней амплитуды обеих компонент поднесущей различают следующие виды КАМ: КАМ-16, КАМ-64,

КАМ-256 и т.д. Числа 16, 64 и 256 соответствуют числу точек M в созвездии сигнала КАМ, оно равно числу вариантов передаваемого сигнала на каждой комплексной поднесущей. При модуляции ОФМ-1 число $M = 2$, а при модуляции ОФМ-2 число $M = 4$. От числа M зависит количество бит информации V , передаваемых за длительность T передачи варианта сообщения на k -ой поднесущей:

$$V = \log_2 M.$$

В цифровых модуляторах OFDM частота дискретизации F_d выбирается из условия, чтобы на интервале T размещалось N отсчетов сигнала OFDM. Тогда частота дискретизации будет равна:

$$F_d = N/T = N \cdot F_p.$$

Комплексный цифровой сигнал на выходе k -ого КСГ при использовании модуляции КАМ будет равен:

$$S_k(n) = S_k \cdot \exp(j2\pi nk/N),$$

где $\exp(j2\pi nk/N) =$
 $= \cos(2\pi nk/N) + j \cdot \sin(2\pi nk/N).$

Это выражение описывает цифровую комплексную поднесущую на выходе k -ого КСГ, где $n = 0, 1, 2, 3 \dots N-1$ – номера отсчетов комплексного цифрового сигнала на выходе k -ого КСГ на временном интервале T . Символы S_k определяют передаваемый двоичный код на k -ой частоте, они задаются парой чисел A_{CK} и A_{SK} , определяющих амплитуды косинусной и синусной компонент КСГ. Число A_{CK} умножается на косинусную компоненту КСГ, а число A_{SK} умножается на синусную компоненту КСГ. При использовании в КСГ модуляции ОФМ-1 число $A_{CK} = 1$ или $A_{CK} = -1$, а число $A_{SK} = 0$, при модуляции ОФМ-2 число $A_{CK} = 1$ или $A_{CK} = -1$, число $A_{SK} = 1$ или $A_{SK} = -1$. При модуляции КАМ-16 числа A_{CK} и A_{SK} определяются из таблицы 1 в соответствии с созвездием КАМ-16 [5].

Сумма отсчетов цифровых сигналов с выходов всех КСГ на n -ом отсчете будет равна:

$$s(n) = N^{-1} \sum_{k=0}^{N-1} S_k \exp(j2\pi nk/N). \quad (1)$$

Здесь суммирование осуществляется по всем КСГ с номерами k от 0 до $N-1$. Это выражение соответствует формуле вычисления обратного дискретного преобразования Фурье (ОДПФ). Далее отсчеты $s(n)$ поступают на цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), затем на повышающий преобразователь частоты, усилитель мощности и на антенну передатчика.

Таблица 1. Соответствие передаваемого кода и уровней амплитуды косинусной и синусной компонент КСГ на k -ой поднесущей при КАМ-16

Передаваемый код	Число A_{CK}	Число A_{SK}
0000	1	1
0001	1	3
0010	1	-1
0011	1	-3
0100	3	1
0101	3	3
0110	3	-1
0111	-3	-3
1000	-1	1
1001	-1	3
1010	-1	-1
1011	-1	-3
1100	-3	1
1101	-3	3
1110	-3	-1
1111	-3	-3

Принцип работы демодуляторов OFDM

В демодуляторах сигналов OFDM вначале с помощью преобразователя понижается частота принятого сигнала, затем с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) из него формируются отсчеты $s(n)$, как на выходе модулятора сигнала OFDM. Затем по формуле вычисления прямого дискретного преобразования Фурье (ПДПФ) вычисляются символы S_k .

$$S_k = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \exp(-j2\pi nk/N). \quad (2)$$

Они определяются парой чисел A_{CK} и A_{SK} амплитуд действительной косинусной и мнимой синусной компонент КСГ. Далее в соответствии с таблицей 1 по значениям чисел A_{CK} и A_{SK} формируются двоичные коды, принятые на k -ой частоте сигнала. Отметим, что вычисления формул (1) и (2) можно выполнять по алгоритму быстрого преобразования Фурье (БПФ), который значительно уменьшает вычислительные затраты при реализации цифровых модемов на основе БПФ по сравнению с модемами на основе КСГ [6; 7]. Но принцип работы этих типов модемов одинаков и описывается формулами (1) и (2).

Влияние эффекта Доплера на работу демодуляторов OFDM

За счет взаимного перемещения передатчика (модулятора) и приемника (демодулятора) происходит смещение спектра сигнала в приемнике

на величину доплеровского сдвига $F_{CD} = f_c v/c$, где f_c – частота сигнала, v – взаимная скорость перемещения передатчика и приемника, c – скорость распространения радиоволн, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Например, при частоте сигнала $f_c = 500$ МГц и $v = 300$ м/с величина доплеровского сдвига $F_{CD} = 500$ Гц. Т.к. скорость v – величина векторная, поэтому при сближении передатчика и приемника скорость v больше нуля, а при удалении передатчика и приемника друг от друга скорость v будет меньше нуля. По этой причине и доплеровский сдвиг частоты F_{CD} может быть положительным или отрицательным.

Рассмотрим, как повлияет сдвиг спектра принимаемого сигнала на величину F_{CD} на работу демодулятора OFDM. Для этого опишем работу демодулятора сигнала OFDM на частоте f_k . При модуляции КАМ на вход демодулятора поступает сигнал OFDM вида:

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N-1} (A_{CK} \cos(\omega_k t) + A_{SK} \sin(\omega_k t)), \quad (3)$$

где $\omega_k = 2\pi f_k t$ – угловая частота k -ого КСГ.

Отметим, что если сигналы $x_1(t)$ и $x_2(t)$ ортогональны на временном интервале T , тогда определенный интеграл от произведения этих сигналов на интервале T равен нулю.

Если эффект Доплера отсутствует, то при синхронной и синфазной работе КСГ на передающей и приемной стороне на выходах k -ого КСГ демодулятора формируются сигналы:

$$c(t) = 2 \cos(\omega_k t), \quad s(t) = 2 \sin(\omega_k t). \quad (4)$$

Тогда с учетом условия ортогональности результаты интегрирования произведений $x(t)c(t)$ и $x(t)s(t)$ на временном интервале ортогональности поднесущих T будут равны:

$$X_{CK} = T^{-1} \int_0^T x(t)c(t)dt = A_{CK}, \quad (5)$$

$$X_{SK} = T^{-1} \int_0^T x(t)s(t)dt = A_{SK}. \quad (6)$$

Сигналы A_{CK} и A_{SK} являются выходными сигналами канала демодулятора на частоте f_k . Далее по значениям сигналов A_{CK} и A_{SK} в соответствии с таблицей 1 формируются кодовые комбинации на выходе k -ого частотного канала. Из выражений (5) и (6) следует, что благодаря ортогональности поднесущих всех КСГ на интервале ортогональности T многочастотный модем OFDM работает как одночастотный модем.

Теперь рассмотрим работу демодулятора сигнала OFDM при наличии доплеровского сдвига спектра частоты сигнала на величину F_{CD} . Для

этого преобразуем следующие два выражения, описывающие работу демодулятора OFDM на одной из поднесущих частот сигнала:

$$\begin{aligned} & (A_{CK} \cos(\omega_1 t) + A_{SK} \sin(\omega_1 t)) \cdot 2 \cos(\omega_2 t) = \\ & = A_{CK} \cos(\omega_1 t) \cdot 2 \cos(\omega_2 t) + \\ & + A_{SK} \sin(\omega_1 t) \cdot 2 \cos(\omega_2 t) = A_{CK} \cos(\omega_1 - \omega_2)t + \\ & + A_{CK} \cos(\omega_1 + \omega_2)t + A_{SK} \sin(\omega_1 - \omega_2)t + \\ & + A_{SK} \sin(\omega_1 + \omega_2)t, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & (A_{CK} \cos(\omega_1 t) + A_{SK} \sin(\omega_1 t)) \cdot 2 \sin(\omega_2 t) = \\ & = A_{CK} \cos(\omega_1 t) \cdot 2 \sin(\omega_2 t) + \\ & + A_{SK} \sin(\omega_1 t) \cdot 2 \sin(\omega_2 t) = \\ & = -A_{CK} \sin(\omega_1 - \omega_2)t + A_{CK} \sin(\omega_1 + \omega_2)t + \\ & + A_{SK} \cos(\omega_1 - \omega_2)t - A_{SK} \cos(\omega_1 + \omega_2)t. \end{aligned} \quad (8)$$

Отфильтруем с помощью фильтров низких частот (ФНЧ) высокочастотные составляющие в сигналах (7) и (8) и получим на выходах ФНЧ только низкочастотные составляющие:

$$\begin{aligned} y_C(t) &= A_{CK} \cos(\omega_1 - \omega_2)t + \\ & + A_{SK} \sin(\omega_1 - \omega_2)t, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} y_S(t) &= -A_{CK} \sin(\omega_1 - \omega_2)t + \\ & + A_{SK} \cos(\omega_1 - \omega_2)t. \end{aligned} \quad (10)$$

Отметим, что при равенстве частот ω_1 и ω_2 из выражений (9) и (10) получим значения $y_C(t) = A_{CK}$, $y_S(t) = A_{SK}$, т.е. тот же результат, что при отсутствии эффекта Доплера. При неравенстве частот ω_1 и ω_2 проинтегрируем сигналы $y_C(t)$ и $y_S(t)$ на временном интервале от 0 до T и получим:

$$\begin{aligned} Y_C &= T^{-1} \int_0^T (A_{CK} \cos(\omega_1 - \omega_2)t + A_{SK} \sin(\omega_1 - \omega_2)t)dt = \\ & = A_{CK} \sin \alpha / \alpha + A_{SK} (1 - \cos \alpha) / \alpha, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} Y_S &= T^{-1} \int_0^T (A_{SK} \cos(\omega_1 - \omega_2)t - A_{CK} \sin(\omega_1 - \omega_2)t)dt = \\ & = A_{SK} \sin \alpha / \alpha - A_{CK} (1 - \cos \alpha) / \alpha. \end{aligned} \quad (12)$$

В выражениях (11) и (12) обозначены $\omega_2 = \omega_k$, $\omega_1 = \omega_k + 2\pi F_{CD}$, $\alpha = (\omega_1 - \omega_2)T = 2\pi F_{CD}T/F_p$ – нормированный к разносу частот поднесущих в сигнале OFDM доплеровский сдвиг частоты. При отсутствии доплеровского сдвига частоты величины $F_{CD} = 0$, $\alpha = 0$, тогда неопределенности вида $0/0$ в сомножителях $\sin \alpha / \alpha$ и $(1 - \cos \alpha) / \alpha$ определим при $\alpha = 0$ по правилу Лопиталя и получим $\sin \alpha / \alpha = 1$, $(1 - \cos \alpha) / \alpha = 0$. Таким образом, при отсутствии эффекта Доплера из (11) и (12) следует, что $Y_C = A_{CK}$, $Y_S = A_{SK}$, т.е. демодулятор OFDM

точно восстанавливает передаваемые кодовые сообщения таблицы 1. При $\alpha > 0$ точная работа демодулятора OFDM нарушается. Во-первых, за счет множителя $\sin \alpha / \alpha$ в первом слагаемом чисел Y_C и Y_S уменьшаются истинные значения чисел A_{CK} и A_{SK} , а за счет второго слагаемого на результат влияет амплитуда квадратурной компоненты сигнала с множителем $(1 - \cos \alpha) / \alpha$, причем в числе Y_C она суммируется с первым слагаемым, а в числе Y_S она вычитается из первого слагаемого. В таблице 2 приведены значения множителей $\sin \alpha / \alpha$ и $(1 - \cos \alpha) / \alpha$ при различных значениях α . Отметим, что при $\alpha < 0$ множитель $\sin \alpha / \alpha$ остается положительным, а множитель $(1 - \cos \alpha) / \alpha$ тоже становится отрицательным.

Таблица 2. Значения множителей $(1 - \cos \alpha) / \alpha$ и $\sin \alpha / \alpha$ от нормированного к разному частот поднесущих доплеровского сдвига частоты $\alpha = 2\pi F_{cd} / F_p$

α	0	$\pi/6$	$\pi/3$	$\pi/2$	π
$\sin \alpha / \alpha$	1	0,95	0,83	0,64	0
$(1 - \cos \alpha) / \alpha$	0	0,25	0,48	0,64	0,64

Полученные выражения (11) и (12) свидетельствуют о том, что эффект Доплера приводит к деформации созвездий сигналов OFDM на приемной стороне, что приводит к появлению ошибок в принимаемых сообщениях и даже к полной потере принимаемых сообщений. Из этих выражений можно получить количественные характеристики демодуляторов сигналов OFDM, такие как пороговые значения доплеровского сдвига частоты F_{Π} выше которого нарушается работа демодулятора и возникают ошибки в принимаемых сообщениях даже при отсутствии помех в канале.

Определение пороговых значений доплеровского сдвига частоты

Пороговое значение доплеровского сдвига частоты F_{Π} и соответствующее ему нормированное пороговое значение $\alpha_{\Pi} = 2\pi F_{\Pi} / F_p$ для вида модуляции КАМ поднесущих определим из условия, когда изменение уровня компонент Y_C и Y_S в выражениях (11) и (12) превысит значения ΔY_C и ΔY_S , при которых демодулятор сигнала OFDM воспроизведет ошибочную кодовую комбинацию, соответствующую соседней точке в созвездии сигналов КАМ. Рассмотрим модуляцию поднесущих по алгоритму КАМ-16, которому соответствует таблица 1. Отметим, что для определения пороговых значений α_{Π} достаточно воспользоваться одним из выражений (11) или (12) в

силу их идентичности. Выберем выражение (11), из которого следует, что при нормированном значении $\alpha = 0$ получается точное значение компоненты $Y_{CO} = A_{CK}$, приведенное в таблице 1. Из-за доплеровского сдвига частоты произойдет изменение компоненты Y_C на величину $\Delta Y_C = Y_{CO} - Y_C$. Подставим сюда значение Y_C из (11) и получим:

$$\Delta Y_C = A_{CK} (1 - \sin \alpha / \alpha) - A_{SK} (1 - \cos \alpha) / \alpha. \quad (13)$$

Из полученного выражения (13) определим нормированные пороговые значения α_{Π} для различных созвездий сигналов КАМ. Для сигналов КАМ-16 из таблицы 1 следует, что величина $\Delta Y_C = 1$. Подставим в (13) минимальное по модулю значение $A_{CK} = 1$ и максимальное значение $A_{SK} = 3$ и получим уравнение для расчета порогового значения α_{Π} :

$$3 \cos \alpha_{\Pi} - \sin \alpha_{\Pi} = 3.$$

Приближенное решение этого трансцендентного уравнения $\alpha_{\Pi} = -0,666$. Погрешность ошибки решения составляет 0,03. Знак минус в решении означает, что пороговый сдвиг по частоте отрицательный. Если подставим в (13) максимальные значения $A_{CK} = 3$ и $A_{SK} = 3$, то при $\Delta Y_C = 1$ получим следующее уравнение:

$$\sin \alpha_{\Pi} = \cos \alpha_{\Pi} = 1 + 2\alpha_{\Pi} / 3.$$

Приближенное решение этого трансцендентного уравнения $\alpha_{\Pi} = 0,666$, это означает, что пороговый сдвиг по частоте в данном случае по величине такой же, что и в предыдущем случае, но по знаку положительный.

Проведем аналогичные вычисления для сигналов КАМ-64, КАМ-256 и КАМ-1024 и сведем результаты вычислений в таблицу 3. Из созвездий перечисленных сигналов следует, что для сигналов КАМ-64 максимальные значения $A_{CK} = 7$ и $A_{SK} = 7$, для сигналов КАМ-256 максимальные значения $A_{CK} = 15$ и $A_{SK} = 15$, для сигналов КАМ-1024 максимальные значения $A_{CK} = 31$ и $A_{SK} = 31$. Как показали приведенные выше расчеты для КАМ-16, пороговые значения доплеровского сдвига частоты могут быть как со знаком плюс, так и со знаком минус. В таблице 3 приведены пороговые значения доплеровского сдвига частоты только со знаком плюс.

Из таблицы 3 следует, что с увеличением плотности созвездия сигналов КАМ, когда расстояния между точками в созвездии уменьшаются, тогда и пороговые значения доплеровского сдвига частоты уменьшаются. Отметим, что при использовании в расчетах по формуле (13) нормированных созвездий сигналов КАМ, у которых максимальные значения $A_{CK} = 1$ и $A_{SK} = 1$,

а значения $\Delta Y_c = 1/3$ для КАМ-16, $\Delta Y_c = 1/7$ для КАМ-64, $\Delta Y_c = 1/15$ для КАМ-256, $\Delta Y_c = 1/31$ для КАМ-1024, результаты расчетов совпадают со значениями, приведенными в таблице 3.

Таблица 3. Пороговые значения доплеровского сдвига частоты для разных видов модуляции КАМ поднесущих сигнала OFDM

Вид модуляции	КАМ-16	КАМ-64	КАМ-256	КАМ-1024
α_{Π}	0,666	0,286	0,133	0,064
F_{Π} / F_p	0,101	0,045	0,021	0,01

Заключение

Из материала статьи следует, что работа демодуляторов сигналов OFDM в каналах с эффектом Доплера при определенных условиях становится невозможной даже при благоприятной помеховой обстановке. В таблице 3 приведены результаты расчетов пороговых значений доплеровского сдвига частоты при модуляции поднесущих сигнала OFDM по алгоритму КАМ, при превышении которых нормальная работа демодулятора нарушается. Если в реальных условиях эксплуатации модемов OFDM доплеровский сдвиг частоты превышает приведенные в этой таблице пороговые значения, то на приемной стороне необходимо применить меры к устранению эффекта Доплера. Во-первых, в приемнике необходимо применять систему автоматической подстройки частоты (АПЧ) сигнала OFDM за счет автоподстройки частоты гетеродина приемника. В контуре управления системы АПЧ включен частотный детектор, который формирует управляющий частотой гетеродина приемника сигнал, пропорциональный величине и знаку доплеровского сдвига F_{CD} . За счет этого сигнала частотный сдвиг F_{CD} сигнала на выходе преобразователя частоты в приемнике уменьшается в коэффициент $K_{АПЧ}$, например, при $K_{АПЧ} = 10$ частотный сдвиг F_{CD} уменьшается в 10 раз. Но для обеспечения когерентной работы всех КСГ модулятора и демодулятора в последнем необходимо применить систему фазовой автоподстройки (ФАП) в КСГ. В контуре управления ФАП включен фазовый детектор. В [8; 9; 10] приведены схемы и алгоритмы работы систем ФАП в устройствах цифровой обработки сигналов (ЦОС). Для обеспечения работы ФАП в демодуляторах в сигналах OFDM предусматривают специальные поднесущие, модуляция которых осуществляется по упрощенному алгоритму ОФМ-1, в которых отсутствуют квадратурные компоненты. Благодаря этим поднесущим осуществляется автоподстройка частоты и фазы всех КСГ в демодуляторе OFDM. Кроме того, в

приемниках сигналов OFDM применяется система автоматической регулировки усиления (АРУ), обеспечивающая калибровку уровней сигналов $A_{СК}$ и $A_{СК}$ для нормальной работы решающих устройств по формированию принятых кодовых комбинаций при изменении уровня принимаемых сигналов. Применение описанных устройств в приемниках обеспечивает нормальную работу демодуляторов сигналов OFDM по радиоканалам с эффектом Доплера.

Литература

1. Вишневецкий В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G: монография. М.: Техносфера, 2009. 472 с.
2. Балашов В.А., Воробийченко П.П., Ляховецкий Л.М. Системы передачи ортогональными гармоническими сигналами. М: Эко-Трендз, 2012. 228 с.
3. Карякин В.Л. Цифровое телевидение: учебное пособие для вузов. М.: Солон-Пресс, 2013. 448 с.
4. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра / под ред. В.И. Журавлева; пер. с англ. М.: Радио и связь, 2000. 520 с.
5. Мишин Д.В., Тяжев А.И. Реализация высокоскоростных модемов OFDM для радиоканалов с замираниями сигнала // Инфокоммуникационные технологии. 2020. Т. 18, № 2. С. 194–200. DOI: 10.18469/ikt.2020.18.2.10
6. Тяжев А.И., Мишин Д.В. Сравнительная оценка вычислительных затрат при реализации цифровых модемов OFDM на основе КСГ и БПФ // Приложение к журналу Инфокоммуникационные технологии. 2011. № 8. С. 32–38.
7. Мишин Д.В., Тяжев А.И. Описание цифровых систем разными схемами построения // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Т. 25, № 2. С. 60–66. DOI: 10.18469/1810-3189.2022.25.2.60-66
8. Иванова В.Г., Тяжев А.И. Цифровая обработка сигналов и сигнальные процессоры / под ред. А.И. Тяжева. Самара: ИУНЛ ПГУТИ, 2008. 305 с.
9. Тяжев А.И. Выходные устройства приемников с цифровой обработкой сигналов. Самара: Издательство Самарского университета, 1992. 276 с.
10. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2003. 608 с.

Дата поступления 10.01.2025

Дата принятия 10.02.2025

Тяжев Анатолий Иванович, д.т.н., профессор, профессор кафедры радиоэлектронных систем Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Льва Толстого, 23. Тел. +7 846 339-11-88. E-mail: a.tyagev@psuti.ru

UDC 636.002.27

DOI: 10.18469/ikt.2025.23.1.06

THE INFLUENCE OF THE DOPPLER EFFECT ON THE OPERATION OF OFDM SIGNAL MODEMS

Tyazhev A.I.

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation
E-mail: a.tyagev@psuti.ru

The article analyzes the influence of OFDM signals on the operation of modems in radio channels in which the spectrum of the received signal is shifted due to the Doppler effect, which occurs due to the mutual movement in space of the transmitter and receiver signals. According to the analysis results, it is shown that the Doppler effect has a negative impact on the operation of OFDM signal modems, significantly reduces the noise immunity of OFDM demodulators to the point of disrupting message transmission when the frequency shift exceeds the threshold value. The article suggests measures to reduce and eliminate the negative impact of the Doppler effect on modem operation, including the use of the automatic frequency tuning systems, phase auto-tuning systems, and oscillator synchronization systems in OFDM signal demodulators using reference subcarriers in OFDM signals.

Keywords: *OFDM signals, OFDM signal modems based on cosine-sine generators and on the basis of DFT, the influence of the Doppler effect on the operation of OFDM signal modems, threshold values of the Doppler effect, elimination of the influence of the Doppler effect on the operation of OFDM signal modems*

Tyazhev Anatoly Ivanovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Professor of Radioelectronic Systems Department; Doctor of Technical Sciences. Tel. +7 846 339-11-88. E-mail: a.tyagev@psuti.ru

References

1. Vishnevsky V.M., Portnoi S.L., Shakhnovich I.V. *The WiMAX Encyclopedia. Path to 4G: Monograph*. Moscow: Tekhnosfera, 2009, 472 p. (In Russ.)
2. Balashov V.A., Vorobienko P.P., Lyakhovetsky L.M. *Orthogonal Harmonic Signal Transmission Systems*. Moscow: Eko-Trendz, 2012, 228 p. (In Russ.)
3. Karyakin V.L. *Digital Television: Textbook for Universities*. Moscow: Solon-Press, 2013, 448 p. (In Russ.)
4. Feer K. *Wireless Digital Communication. Methods of Modulation and Spectrum Expansion*. Ed by V.I. Zhuravlev. Transl. from English. Moscow: Radio i svyaz', 2000, 520 p. (In Russ.)
5. Mishin D.V., Tyazhev A.I. Implementation of high-speed OFDM modems for radio channels with signal fading. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2020. vol. 18, no. 2. pp. 194–200. DOI: 10.18469/ikt.2020.18.2.10 (In Russ.)
6. Tyazhev A.I., Mishin D.V. Comparative evaluation of computing costs in the implementation of OFDM digital modems based on KSG and FFT. *Prilozhenie k zhurnalu Infokommunikacionnye tehnologii*. 2011, no. 8, pp. 32–38. (In Russ.)
7. Mishin D.V., Tyazhev A.I. Description of digital systems by various construction schemes. *Physics of Wave Processes and Radio Engineering Systems*, 2022, vol. 25, no. 2. pp. 60–66. DOI: 10.18469/1810-3189.2022.25.2.60-66 (In Russ.)
8. Ivanova V.G., Tyazhev A.I. *Digital Signal Processing and Signal Processors*. Ed by A.I. Tyazhev. Samara: IUNL PGUTI, 2008, 305 p. (In Russ.)

9. Tyazhev A.I. *Output Standards of Receivers with Digital Signal Processing*. Samara: Izd-vo Samarskogo universiteta, 1992, 276 p. (In Russ.)
10. Sergienko A.B. *Digital Signal Processing*. Saint Petersburg: Piter, 2003, 608 p. (In Russ.)

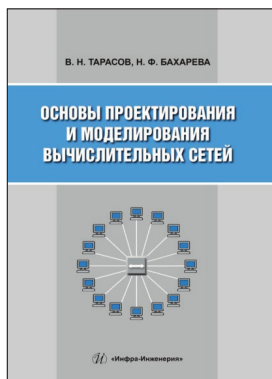
Received 10.01.2025

Accepted 10.02.2025

Реклама

Тарасов, В.Н.

Основы проектирования и моделирования вычислительных сетей: учебное пособие /
В.Н. Тарасов, Н.Ф. Бахарева. – Самара: ИУНЛ ПГУТИ, 2021. – 242 с.



ISBN: 978-5-907336-14-8

УДК: [681.324:519.8+004.421](075.8)

В первой части учебного пособия рассматриваются общие сведения об известных программных продуктах, используемых в предметной области, вероятностно-временные характеристики передачи на базе непрерывных марковских моделей, основные результаты теории массового обслуживания, принципы создания имитационных моделей на основе дискретно-событийного моделирования и принципы топологического проектирования сетей. Приводятся примеры, демонстрирующие возможности применения рассмотренных методов моделирования.

Во второй части учебного пособия представлен лабораторный практикум в среде Riverbed MODELER IT GURU.

Учебное пособие предназначено для студентов (магистров), обучающихся по направлениям подготовки 09.04.01 – Информатика и вычислительная техника, 09.04.04 – Программная инженерия, 27.04.04 – Управление в технических системах и может быть полезно аспирантам направления подготовки 09.06.01 – Информатика и вычислительная техника.