

Помехоустойчивость биортогональной М-мерной сигнальной конструкции в гауссовом канале

М.М.Медведев, магистрант МТУСИ / med.mikhail2012@ya.ru,
С.С.Шаврин, д.т.н., профессор кафедры МТС МТУСИ / sss@mtuci.ru

УДК 004.722.45, DOI: 10.22184/2070-8963.2024.123.7.60.65

Рассмотрен выбор вида модуляции для радиосистем, предназначенных для работы в отсутствии жестких ограничений к занимаемому диапазону частот. Для таких систем предлагается использование многопозиционной частотной манипуляции (М-FSK), имеющей высокую энергетическую эффективность и низкое значение пик-фактора излучаемого сигнала. Представлен анализ принципиальных особенностей манипуляции М-FSK, имеющей высокую энергетическую эффективность. Приведены результаты моделирования помехоустойчивости канала передачи для различных значений индекса и кратности модуляции, а также соответствующие спектральные характеристики. Разработаны рекомендации по реализации систем с М-FSK.

Введение

Для традиционно используемых видов цифровой модуляции (манипуляции) увеличение энергетической эффективности уменьшает спектральную эффективность и наоборот [1]. Невысокая спектральная эффективность М-FSK часто является препятствием для использования этого вида манипуляции в коммерческих системах, в которых по причине высокой стоимости выделения частотных диапазонов требуются сигнальные конструкции, имеющие максимально возможный узкий частотный спектр. В отсутствие же частотных ограничений (будь то ограничения регулятора или стоимостные) существует возможность значительного повышения помехозащищенности системы связи за счет расширения спектра. Например, как будет показано далее, энергетический выигрыш при использовании 256-FSK по сравнению с традиционной BPSK составляет 4 дБ, а при использовании 64-FSK – 3 дБ.

Заметим, что задача синтеза помехоустойчивой сигнально-кодовой конструкции качественно упрощается при использовании манипуляции М-FSK. Кроме того, получаемый таким образом энергетический выигрыш дает возможность построить систему с большей пропускной способностью. Такая система способна адаптироваться под текущее состояние среды передачи посредством автоматического изменения параметров М-FSK. Особенно привлекательным использование такой модуляции видится при реализации на DSP-процессорах, базовый набор инструкций которых включает в себя примитивы алгоритмов быстрого преобразования Фурье. При этом процессы модуляции и демодуляции сигнала производятся в частотном домене, без использования табличных значений гармонических функций, что позволяет минимизировать задержки и блокировки конвейера при обращении к внешней памяти.

Далее в статье экспериментально исследуются свойства М-FSK манипуляции, в частности, зависимость ошибки на бит (BER) от индекса манипуляции h , зависимости BER и средней мощности от порядка манипуляции M , зависимость BER от расстройки по частоте.

Принципиальные особенности манипуляции М-FSK

Манипуляция М-FSK использует набор из M ортогональных частот для создания сигнального пространства, состоящего из M сигнальных FSK-созвездий. В отличие от традиционно используемых угловых и амплитудных методов манипуляции, в которых с ростом порядка размерности сигнального пространства не изменяется, а межсимвольное расстояние уменьшается, в М-FSK с увеличением порядка M расстояния между символами не изменяются в силу взаимной пространственной ортогональности созвездий. Такая особенность многопозиционной частотной манипуляции приводит к тому, что при одинаковом отношении энергии бита к спектральной плотности мощности шума (E_b/N_0) увеличение M приводит к уменьшению вероятности ошибки на бит (BER).

В общем случае биортогональная манипуляция М-FSK строится следующим образом.

$$s_m(t) = \sqrt{\left(\frac{2E_s}{T}\right)} \cos[2\pi(f_c + (n-1)F_{sep})t], \quad (1)$$

$$\text{где } n=1\dots M; F_{sep} = \frac{1}{2T}.$$

Поскольку множество $M = 2^k$ биортогональных сигналов строится из $N = 1/2 M$ ортогональных сигналов путем включения отрицательных частот [1], соответствующие сигналы представляются в векторной форме как:

$$\begin{aligned} s_1 &= -s_{N+1} = (\sqrt{E}, 0, \dots, 0), \\ s_2 &= -s_{N+2} = (0, \sqrt{E}, \dots, 0), \\ &\dots \\ s_N &= -s_{2N} = (0, 0, \dots, \sqrt{E}). \end{aligned} \quad (2)$$

Разнесение частот через индекс модуляции h выражается следующим образом:

$$F_{sep} = Br \cdot h, \quad (3)$$

где Br –символьная скорость (baud rate), бод.

При этом сигналы $s_1 \dots s_N$ ортогональны, если $2h \in N$. Тогда ширина занимаемого спектра М-FSK:

$$\Delta F_s = 2^k F_{sep} = 2^k Br \cdot h. \quad (4)$$

Выразим (4) через битовую скорость (bit rate) $br = Br \cdot k$:

$$\Delta F_s = \frac{2^k br \cdot h}{k}. \quad (5)$$

Вероятность ошибки на бит для биортогональной манипуляции [1]:

$$P_e = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\sqrt{2E/N_0}}^{\infty} \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-(v+\sqrt{2E/N_0})}^{v+\sqrt{2E/N_0}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \right)^{M/2-1} e^{-\frac{v^2}{2}} dv. \quad (6)$$

Результаты вычислительных экспериментов

Для исследования свойств манипуляции М-FSK в среде MATLAB была реализована модель канала с Гауссовым шумом (fskmod, fskdemod, awgn). При вычислении BER использовалась функция biterr, на вход которой подавались два вектора: исходный и демодулированный сигналы. Оценка теоретического BER для PSK-манипуляции получена через berawgn.

График зависимости значений синфазной и квадратурной составляющих (I/Q data) для сигнала 2-FSK от времени приведен на рис.1. В сущности, таковая зависимость является графическим представлением траектории, описываемой вектором комплексной амплитуды (фазором) сигнала при своем вращении во времени. По рисунку можно легко наблюдать моменты смены несущей (как изменение направления вращения фазора). Кроме того, отчетливо наблюдается постоянство модуля этого вектора, что

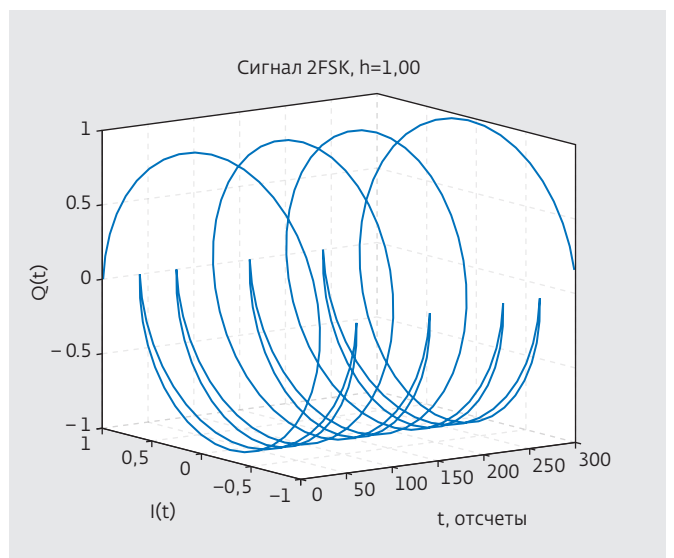


Рис.1. Зависимость значений синфазной и квадратурной составляющих (I/Q data) для сигнала 2-FSK от времени

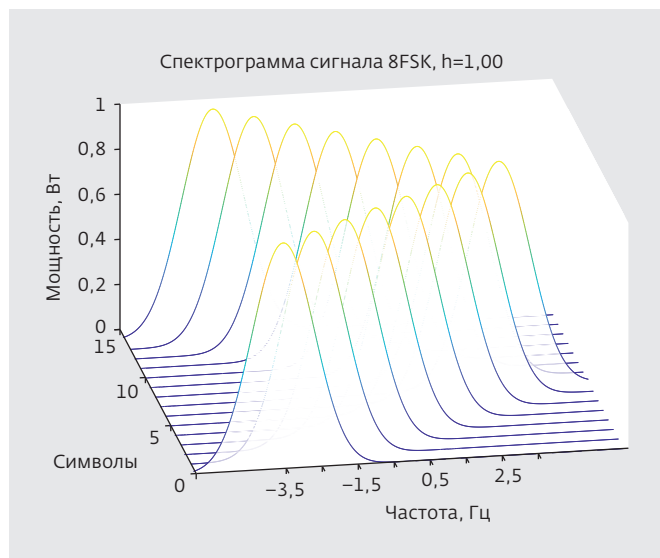


Рис.2. Спектрограмма сигнала 8-FSK

в свою очередь позволяет сделать вывод о постоянстве огибающей сигнала M-FSK.

Спектрограмма сигнала 8-FSK манипуляции для входной последовательности символов [0, 1,...7, 7, 6, 5 ...0] приведена на рис.2. При построении спектрограммы использовалось кратковременное преобразование Фурье (STFT) с окном Кайзера, разрешение по времени – 1 символ, перекрытие сегментов отсутствует.

График зависимости BER от E_b/N_0 (водопадные кривые) для различных индексов манипуляции h

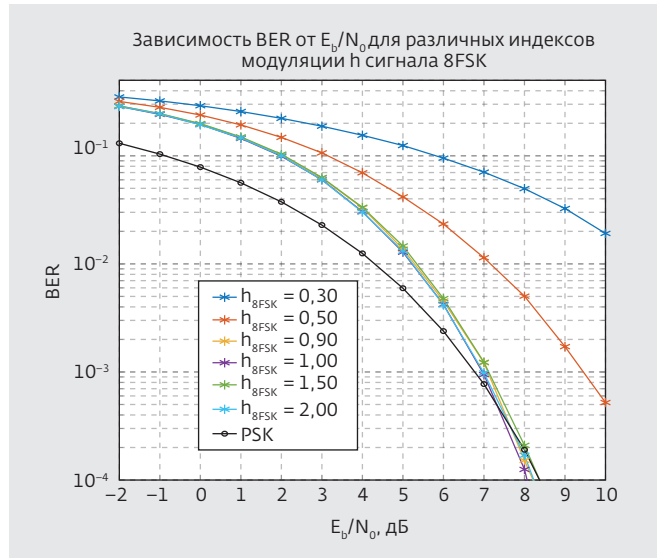


Рис.3. Водопадные кривые для различных индексов манипуляции 8-FSK

приведен на рис.3. Легко заметить, что при недостаточном частотном разнесении ($h < 1$) или несоблюдении ортогональности ($2h \notin \mathbb{N}$) помехозащищенность ухудшается, причем в большей степени по первой из двух перечисленных причин. Кроме того, значительного снижения вероятности ошибки на бит при манипуляции высших индексов $h > 1$ не наблюдается, что в свою очередь определяет верхнюю границу ширины спектра, при которой дальнейшее его расширение не имеет смысла.

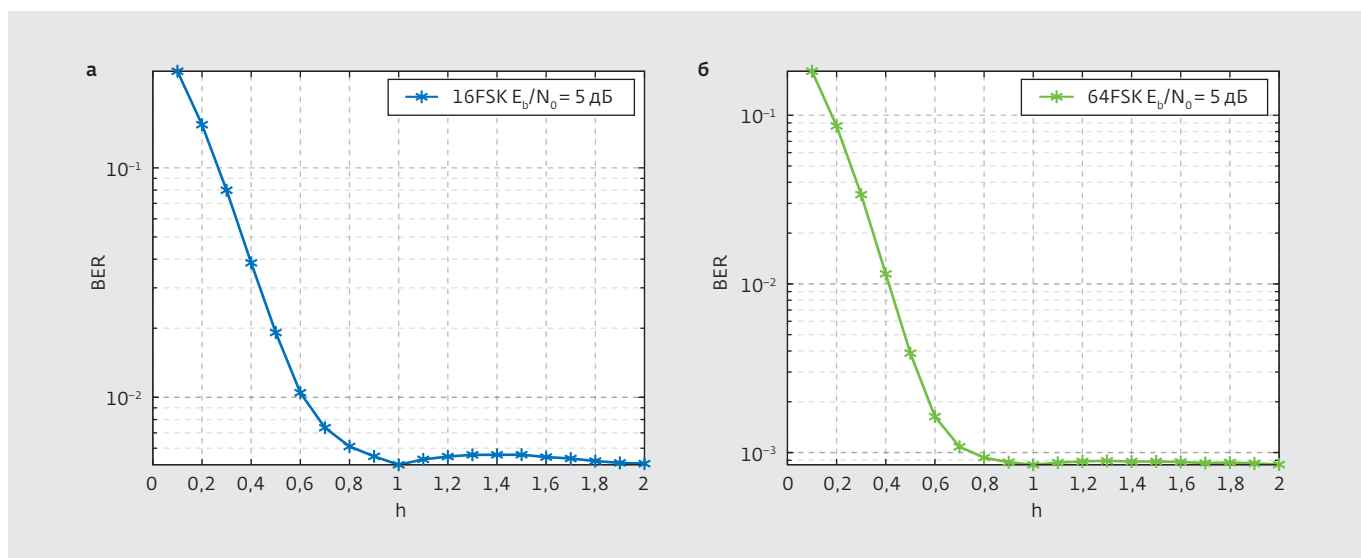


Рис.4. а – зависимость BER от индекса манипуляции h для 16-FSK; б – зависимость BER от индекса манипуляции h для 64-FSK

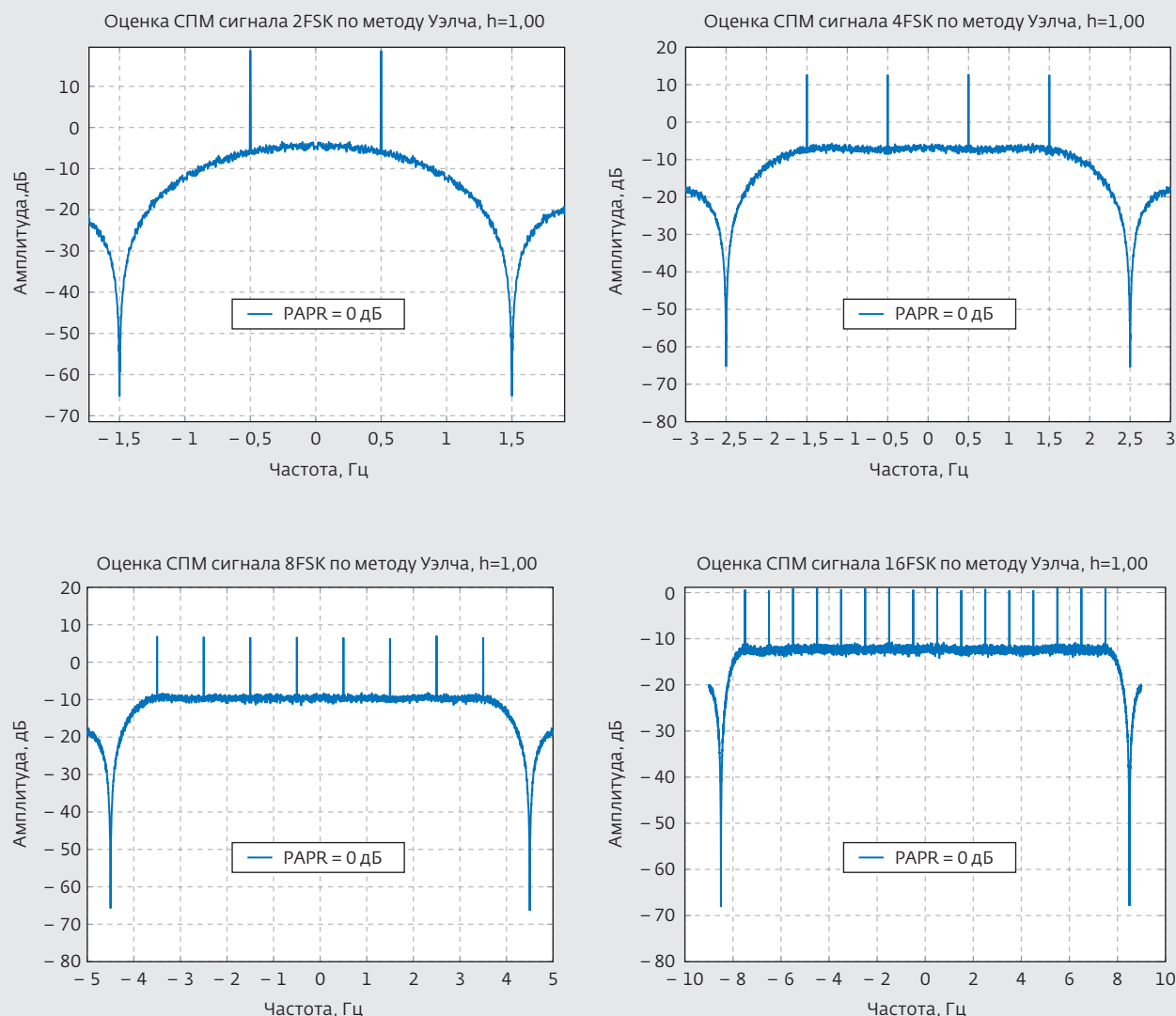


Рис.5. Спектральная плотность мощности и ее среднеквадратические значения для манипуляции M-FSK ($M = 2, 4, 8, 16$)

Зависимость вероятности ошибки на бит (BER) от индекса манипуляции h приведена на рис.4а и б для 16-FSK и 64-FSK соответственно.

Оценка спектральной плотности мощности по методу Уэлча [2], средние значения мощности сигнала и его пик-фактор (PAPR) для манипуляции MFSK индексом $h = 1$ различных порядков приведены на рис.5. Из расчета следует, что с увеличением порядка манипуляции мощность сигнала не изменяется, при этом пик-фактор, в силу постоянства огибающей, остается равным 0 дБ.

Водопадные кривые манипуляции порядков ($M = 2...256$) приведены на рис.6.

Графически зависимость BER от расстройки по частоте представлена на рис.7. Здесь F_{sep} – частота между несущими, F_{off} – частота расстройки.

Из сравнения представленных на рис.4а и б графиков нетрудно заметить, что при $M \rightarrow \infty$ отношение $\text{BER}(0,9)/\text{BER}(1)$ стремится к 1. Этот факт подтверждается результатами численных экспериментов, в ходе которых было установлено, что при уменьшении индекса манипуляции h с 1 до 0,9 (сужении спектра на 10%) относительная потеря в помехоустойчивости для 16FSK составляет 8,8%, для 64-FSK – 3,6%, для 256-FSK – 2,1%. Другими словами, спектральная эффективность манипуляций высших

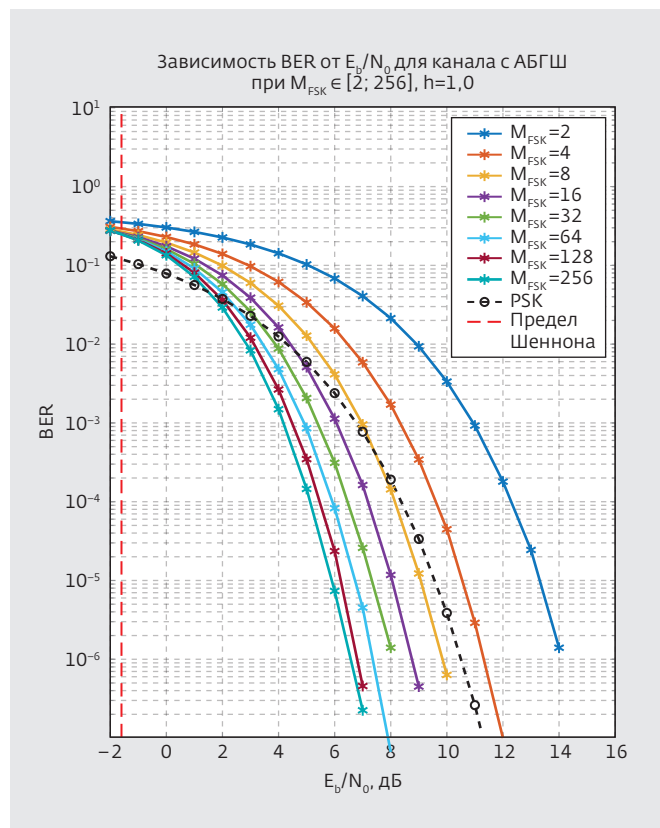


Рис.6. Водопадные кривые для различных порядков манипуляции ($M = 2 \dots 256$)

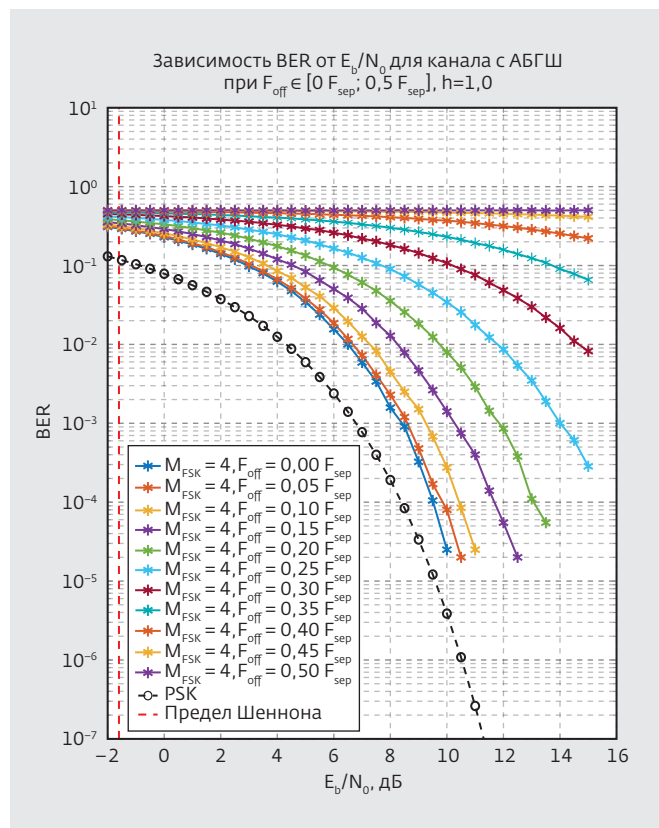


Рис.7. Водопадные кривые для различной частотной расстройки 4-FSK ($F_{off} = 0 \dots 0,5 F_{sep}$)

Таблица 1. Сравнительный анализ манипуляций M-FSK и PSK

Сигнальная конструкция	E_b/N_0 при BER = 10^{-6} , дБ	Спектральная эффективность, бит/с/Гц	Энергетический выигрыш по сравнению с PSK
PSK	10,5	1	—
2-FSK	14	0,5	−3,5 дБ
4-FSK	11,5	0,5	−1 дБ
8-FSK	10	0,38	0,5 дБ
16-FSK	8,5	0,25	2 дБ
32-FSK	8	0,16	2,5 дБ
64-FSK	7,5	0,09	3 дБ
128-FSK	7	0,05	3,5 дБ
256-FSK	6,5	0,03	4 дБ

порядков может быть значительно улучшена без заметного ущерба помехоустойчивости за счет понижения индекса манипуляции h .

На основании рис.6 очевидно, что с увеличением порядка манипуляции помехозащищенность растет, при этом начиная с 8-FSK традиционная PSK-манипуляция проигрывает по энергетической эффективности. На больших порядках наблюдается значительный энергетический выигрыш. Так, например, получить вероятность битовой ошибки $P_e = 10^{-6}$ при 2-FSK возможно лишь при $E_b/N_0 = 14$ дБ, однако при использовании 256FSK требуется $E_b/N_0 = 6,5$ дБ, то есть имеется выигрыш в 7,5 дБ.

По сравнению с традиционной PSK манипуляцией, при использовании 256-FSK наблюдается более чем двукратный энергетический выигрыш (4 дБ).

Сравнительный анализ манипуляций M-FSK и PSK приведен в табл.1.

Заключение

Многопозиционная частотная манипуляция (M-FSK) является привлекательной сигнальной конструкцией для систем радиосвязи, не ограниченных по ширине занимаемого спектра, поскольку на высоких порядках

манипуляции способна обеспечить значительный энергетический выигрыш (до 4 дБ по сравнению с традиционной PSK-манипуляцией).

Кроме того, преимуществами M-FSK являются постоянство мощности и нулевой пик-фактор. Имеется возможность повышения спектральной эффективности манипуляций высших порядков за счет сужения спектра на 10÷15% без значительного ухудшения помехоустойчивости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Proakis J.G., Salehi M. Digital Communications. 5th Edition. New York: McGraw-Hill, 2008.
2. Welch P.D. The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms // IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics. 1967. Vol. 15. PP. 70–73.
3. Sklar B. Digital Communications: Fundamentals and Applications. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2001.
4. Dan E.D., Russell M.M. Multidimensional Digital Signal Processing. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. 1984.

T2 открывает телеком-мастерскую в МИЭМ Высшей школы экономики

Оператор мобильной связи T2 совместно с Московским институтом электроники и математики имени А.Н. Тихонова (МИЭМ НИУ ВШЭ) организовали мастерскую для подготовки технических специалистов телеком-отрасли.

Мастерская T2 включает проектно-образовательную структуру с предоставлением базового образовательного контента от экспертов компании и индивидуальные образовательные траектории студентов. По результатам работы над проектами они могут претендовать на стажировку и дальнейшее трудоустройство в технических и IT-функциях оператора.

В течение года студенты будут работать над реализацией различных кейсов, в том числе связанных с анализом данных о состоянии телеком-оборудования при развертывании, отладке и поддержании работоспособности сетей мобильной связи. Учащиеся также займутся визуализацией метрик для оценки качественных характеристик покрытия сетей. Во время обучения студентам будут выплачивать стипендию от T2, а результаты выполненных кейсов будут использованы в работе оператора.

В мастерской студенты смогут получить максимальную профильную подготовку для будущей работы в телеком-компаниях. Для управления мастерской и организации учебного процесса в МИЭМ сформирована команда преподавателей с опытом работы у мобильных операторов и ведущих производителей мобильного оборудования. Студентам доступны специальные курсы по всем аспектам мобильной связи, а также основам проектирования мобильных сетей и оборудования.

Наталия Рунова, заместитель гендиректора по организационному развитию и управлению персоналом T2, рассказала: "В условиях дефицита кадров на рынке телеком-отрасли нам, как оператору, необходимо совершенствовать программы по работе со студентами и открывать новые перспективы в обучении для учащихся ведущих университетов. Мы ответственно подошли к формированию мастерской и рады, что смогли воплотить идею в реальность. Наши специалисты будут следить за результатами выполненных проектов и оценивать заинтересованность и вовлеченность участников мастерской – лучших из них мы пригласим в стажерскую программу "Новые герои".

Сергей Портной, профессор МИЭМ, руководитель мастерской, отметил: "Быстрый рост мобильной связи за последние десятилетия, обусловленный технологическим прогрессом в сфере телекоммуникаций и смежных областях технологий (элементная база, прикладные аспекты математики, физики, программирования и других инженерных наук), порождает необходимость в постоянном опережающем притоке кадров в отрасли мобильной связи. В настоящее время существует парадокс – недостаток молодых кадров с высокой теоретической подготовкой и одновременным знанием основ современных телекоммуникаций. Преодолеть это противоречие – именно на это и направлена подготовка специалистов для T2 в вузе с высокой теоретической подготовкой. С другой стороны, проектная система обучения в МИЭМ позволит стипендиатам мастерской, одновременно со специализированным обучением, создавать продукты по заказу T2, необходимые уже сегодня в работе оператора".

По информации Высшей школы экономики