

Влияние характеристик радиопередающих устройств СВЧ на качество передачи цифровых сигналов с фазовой модуляцией

В. И. Носов, М. Г. Кокорич

В статье рассматривается влияние характеристик радиопередающих устройств СВЧ на качество передачи цифровых сигналов с фазовой модуляцией.

При освещении данного вопроса предлагаются математическая модель СВЧ-устройства с амплитудно-фазовой конверсией (АФК) и математические выражения для описания закона изменения огибающей фазоманипулированного (ФМ) сигнала. Рассматриваются факторы, определяющие вероятность ошибочного приёма для сигналов с многопозиционной фазовой модуляцией. Предлагаются меры по снижению АФК и увеличению помехоустойчивости приёма сигналов с М-ФМ.

1. ВВЕДЕНИЕ

Большинство усилительных приборов помимо амплитудных нелинейностей обладает свойством преобразования амплитудной модуляции в фазовую (преобразование АМ/ФМ). Это значит, что изменение огибающей входного сигнала, состоящего из многих частотных составляющих, вызывает изменение фазы каждой компоненты сигнала на выходе.

При передаче сигналов с фазовой модуляцией по радиоканалам неизбежно ограничение спектра сигнала, что приводит к возникновению провалов огибающей ФМ сигнала в моменты смены фазы, причём глубина паразитной амплитудной модуляции тем больше, чем больше скачок фазы. Влияние амплитудно-фазовой конверсии заключается в появлении дополнительных фазовых сдвигов $\Phi_{\text{АФК}}(\rho)$ в составе ФМ сигнала, которые приводят к смещению местоположения сигнальной точки на фазоамплитудной плоскости, причём данное явление будет тем сильнее выражено, чем глубже паразитная амплитудная модуляция. С учётом воздействия на такой сигнал тепловых и нелинейных шумов высокочастотного тракта помехоустойчивость систем связи уменьшается по сравнению с теоретически возможной.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ АМ/ФМ

На рисунке 1 показана предлагаемая модель эффекта АМ/ФМ преобразования, являющаяся подходящей моделью для лампы бегущей волны (ЛБВ) и других усилителей СВЧ [1].

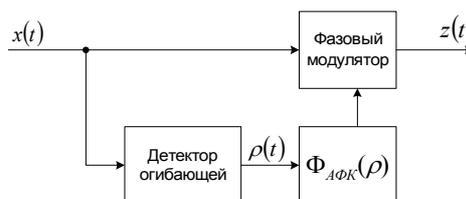


Рис. 1. Модель АМ/ФМ преобразования с характеристикой $\Phi_{\text{АФК}}(\rho)$

На рисунке приняты следующие обозначения: входной фазоманипулированный сигнал с паразитной амплитудной модуляцией:

$$x(t) = \rho(t) \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (1)$$

$\rho(t)$ – закон изменения огибающей,

ρ – относительный уровень входного сигнала, выходной сигнал:

$$z(t) = \rho(t) \cos[\omega_0 t + \varphi + \Phi_{\text{АФК}}(\rho)]. \quad (2)$$

Для оценки влияния АФК целесообразно использовать модель Салеха, предложенную в [2], которая позволяет производить взаимный анализ амплитудной характеристики и АФК (рисунок 2):

$$\Delta\varphi(U_{\text{АМ}}) = \frac{\pi}{6} \frac{2U_{\text{АМ}}^2}{1 + U_{\text{АМ}}^2}, \quad (3)$$

$$U_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{АМ}}) = \frac{2U_{\text{АМ}}}{1 + U_{\text{АМ}}^2}, \quad (4)$$

где $U_{\text{АМ}} = \frac{U}{U_{\text{МАХ}}}$ – нормированная амплитуда фазоманипулированного сигнала.

Анализируя взаимное расположение характеристик АМ/АМ и АМ/ФМ преобразований, можно сделать первоначальный вывод, что паразитный фазовый сдвиг, вызванный АФК в случае использования радиопередатчика в режиме с насыщением, не превысит величины $0,5236 \text{ рад}$ или около 28° . При переходе в линейный режим работы влияние амплитудно-фазовой конверсии уменьшается. Вместе с тем, АФК не влияет на качество передачи сигналов в случае постоянной огибающей фазомодулированного

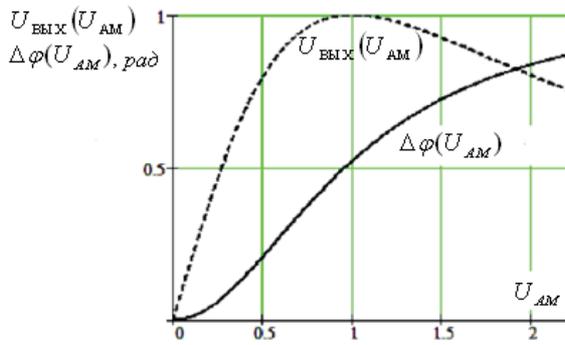


Рис. 2. Характеристики АМ/АМ и АМ/ФМ преобразований сигнала, так как при этом постоянный во времени фазовый сдвиг приводит только к запаздыванию сигнала.

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОГИБАЮЩЕЙ ФМ-СИГНАЛА С ОГРАНИЧЕННЫМ СПЕКТРОМ

Для рассмотрения влияния АФК необходимо знать закон изменения огибающей фазоманипулированного сигнала.

Передача фазоманипулированных сигналов по радиоканалу характеризуется следующей особенностью: при ограничении спектра сигнала на выходе модулятора за счёт переходных процессов в моменты смены фазы возникают провалы огибающей сигнала. Возникающую паразитную амплитудную модуляцию предлагается описать известным выражением амплитудно-модулированного сигнала [3 – 5]:

$$U_{AM}(t) = 1 + m \sin \Omega_s t, \quad (5)$$

где m – глубина паразитной амплитудной модуляции, возникающей в сигнале М-ФМ после ограничения спектра, $\Omega_s = 2\pi F_s$ – частота следования символов модуляции, зависящая от тактовой частоты цифрового сигнала и позиционности модуляции.

Таблица 1. Выражения, аппроксимирующие изменение огибающей ФМ сигнала

Величина скачка фазы на границе символов модуляции $\Delta\phi_i$	m	$U_{AM}(t)$
45°	0,125	$\frac{1 + 0,125 \cdot \sin \Omega_s t}{1,125}$
90°	0,25	$\frac{1 + 0,25 \cdot \sin \Omega_s t}{1,25}$
135°	0,5	$\frac{1 + 0,5 \cdot \sin \Omega_s t}{1,5}$
180°	1	$U(t) = (1 + \sin \Omega_s t) / 2$

Используя данное выражение как основу, можно определить глубину провала огибающей для каждого из возможных скачков фазы при фазовой модуляции, причём при изменении фазы на 180° наблюдается провал огибающей до нуля. Для возможности использования выражения (5) необходимо, чтобы максимальное значение огибающей сигнала $U_{AM}(t)$ не превышало единицы, т. е. нужно произвести нормирование (таблица 1).

$$U_{AM}(t) = \frac{1 + m \sin \Omega_s t}{1 + m}. \quad (6)$$

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ОШИБОЧНОГО ПРИЁМА ФМ СИГНАЛОВ, ПРОШЕДШИХ УСТРОЙСТВА С АФК

Наличие фазового сдвига $\Delta\varphi_{АФК}$ приводит к изменению местоположения сигнальной точки на фазоамплитудной плоскости (рисунок 3), что влечёт к увеличению вероятности ошибочного приёма.

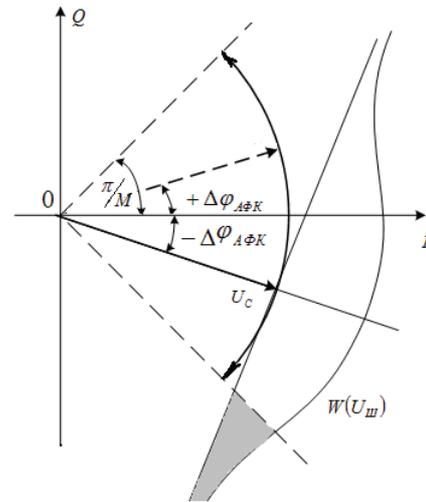


Рис. 3. Изменение расположения сигнальной точки на фазоамплитудной плоскости под влиянием АФК

Используя выражения (3) и (6), можно определить изменение фазы сигнала при различных скачках фазоманипулированного сигнала и соответственно при разной глубине паразитной амплитудной модуляции (рисунок 5):

$$\Delta\varphi_{АФК}(t) = \frac{\pi}{6} \frac{2 \left(\frac{1 + m \sin \Omega_s t}{1 + m} \right)^2}{1 + \left(\frac{1 + m \sin \Omega_s t}{1 + m} \right)^2}. \quad (7)$$

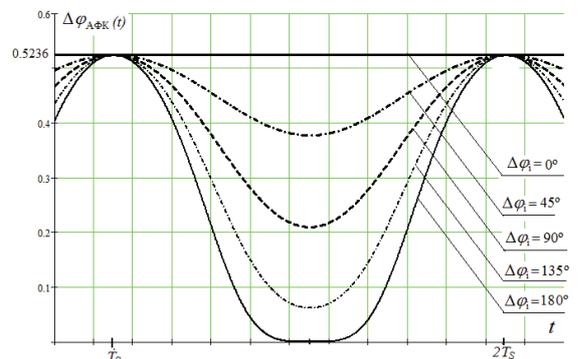


Рис. 4. Фазовый сдвиг за счёт АФК для различных огибающих фазоманипулированного сигнала с паразитной амплитудной модуляцией

Таким образом, местоположение сигнальной точки определяется смещением за счёт АФК, причём на это детерминированное смещение накладывается случайная шумовая составляющая с нормальным законом распределения. Отклонения сигнальной точки за счёт воздействия АФК и гауссовского шума являются независимыми процессами,

так как имеют различную природу возникновения, следовательно, плотность распределения общего результирующего процесса определяется произведением плотностей распределения детерминированной функции изменения фазы и случайного гауссовского процесса [7]

$$W(U_{\Sigma}) = W(U_{Ш})W(\varphi_{АФК}). \quad (8)$$

Для определения закона изменения $W(\varphi_{АФК})$ воспользуемся описанием функции во времени на интервале одного символа модуляции при известном для этого символа модуляции скачке фазы. Распределение фазы на рассматриваемом интервале нелинейно, причём вероятность появления различных значений сдвига фазы неодинакова. Определим плотность вероятности $W(\varphi_{АФК})$ как распределение дискретной случайной величины [8], при этом предполагается, что ФАПЧ фазового детектора демодулятора будет отслеживать постоянный фазовый сдвиг

$$\Delta\varphi_{АФК}(t) = \varphi_0 - \Delta\varphi_{АФК}(t) = 0,5236 - \Delta\varphi_{АФК}(t). \quad (9)$$

На рисунке 5 представлена полученная плотность вероятности $W(\varphi_{АФК})$ для фазового скачка 45° .

Исследованное детерминированное изменение расположения сигнальной точки за счёт АФК приведёт к заведомому уменьшению расстояния ошибок d , которое для M -позиционной модуляции составит величину

$$\frac{d}{2} = \sin\left(\frac{\pi}{M} - \Delta\varphi_{АФК}\right). \quad (10)$$

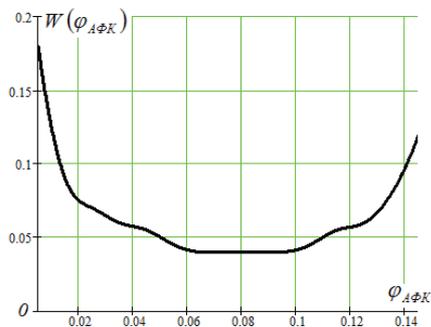


Рис. 5. Плотность распределения величины $\Delta\varphi_{АФК}$

Так как величина $\Delta\varphi_{АФК}$ имеет неравномерную плотность распределения, то при рассмотрении каждого дискретного значения $\Delta\varphi_{АФК_i}$ необходимо учесть вероятность появления такого значения сдвига фазы. В итоге вероятность ошибки сигнала с известным скачком фазы может быть определена как

$$\left(\alpha\right) \frac{\pi}{M} - \Delta\varphi_{АФК} = \frac{1}{\log_2 M} \operatorname{erfc}(z) \int_{\Delta\varphi_{АФК \min}}^{\Delta\varphi_{АФК \max}} W(\varphi_{АФК}) dx, \quad (11)$$

$$\text{где } z = \sin\left(\frac{\pi}{M} - \Delta\varphi_{АФК}\right) \sqrt{\log_2 M} \sqrt{\frac{E_b}{N_0}}.$$

Также можно с достаточной степенью точности аппроксимировать функцию $W(\varphi_{АФК})$ полиномом вида:

$$y(x) = a_1(x - a_2)^6 + a_3, \quad (12)$$

где a_1 – коэффициент, определяющий смещение функции по вертикали,

a_2 – коэффициент, определяющий смещение функции по горизонтали,

a_3 – коэффициент, формирующий требуемую кругизну кривой (таблица 2).

Таблица 2. Функция, аппроксимирующая плотность распределения

$$W(\varphi_{АФК})$$

$\Delta\varphi_i$	a_1	a_2	a_3	Пределы изменения величины $\Delta\varphi_{АФК \min} - \Delta\varphi_{АФК \max}$
45°	0,081	$5 \cdot 10^5$	0,04	0,005 – 0,145
90°	0,126	7500	0,04	0,01 – 0,31
135°	0,22	3000	0,04	0,02 – 0,425
180°	0,26	900	0,04	0,02 – 0,52

Для определения результирующей вероятности ошибки при приёме реального сигнала М-ФМ, необходимо учесть все возможные варианты смены фаз и вероятность появления каждого такого события. Так как число возможных значений фаз модулированной несущей есть конечная величина, соответствующая позиционности модуляции, то её можно представить в виде суммы

$$P_{\Delta\varphi_i} = \int_0^{M+1} W(\Delta\varphi_i) dx = \sum_{i=0}^{M+1} W(\varphi_i) dx. \quad (13)$$

Таблица 3. Вероятность возникновения различных вариантов смены фазы на границах символов модуляции

		Вариант смены фазы	Вероятность смены символа модуляции
1	4-ОФМ	0	0,2
2		$\pm \pi/2$	0,4
3		$\pm \pi$	0,4
1	4-ОФМ-О	0	0,3333
2		$\pm \pi/2$	0,6666
1	8-ОФМ	0	0,111
2		$\pm \pi/4$	0,222
3		$\pm \pi/2$	0,222
4		$\pm 3\pi/4$	0,222
5		$\pm \pi$	0,222

Наличие смены того или иного символа модуляции изначально зависит от состояния информационной цифровой модулирующей последовательности. Скремблирование, применяемое при передаче цифровых сигналов, выравнивает вероятность появления нулей и единиц в информаци-

онном сигнале: $P(0) \approx P(1) \approx 0,5$ [2, 9]. Это, в свою очередь делает равновероятным появление различных символов модуляции, характерных для данного вида манипуляции и соответствующих им значений фаз М-ФМ сигнала. Различные варианты смены фазы на границах символов модуляции и вероятность возникновения таких переходов приведены в таблице 3.

Окончательно обобщая, можно записать вероятность ошибочного приёма сигналов М-ФМ, прошедших тракт радиорелейной линии с нелинейной характеристикой АМ/ФМ преобразования (амплитудно-фазовая конверсия),

$$P_{\text{ош}} \text{ М-ФМ} \left(\alpha \right) \frac{\pi}{M} - \Delta\varphi_{\text{АФК}} = \frac{1}{\log_2 M} \operatorname{erfc}(z) \int_{\Delta\varphi_{\text{АФК min}}}^{\Delta\varphi_{\text{АФК max}}} W(\varphi_{\text{АФК}}) dx \int_0^{M+1} W(\Delta\varphi) dx, \quad (14)$$

где $z_i = \sin\left(\frac{\pi}{M} - \Delta\varphi_{\text{АФК}i}\right) \sqrt{\log_2 M} \sqrt{\frac{E_b}{N_0}}$.

Результаты расчётов представлены на рисунке 8 в виде зависимостей вероятности ошибки от отношения сигнал/шум для 4 и 8 ОФМ с учётом и без учёта действия АФК.

Кривые (рисунок 6) построены в зависимости от величины отношения $P_c/P_{\text{ш}}$ с учётом того, что эта величина связана с E_b/N_0 соотношением [9]

$$\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} = \sqrt{\log_2 M} \frac{E_b}{N_0}. \quad (15)$$

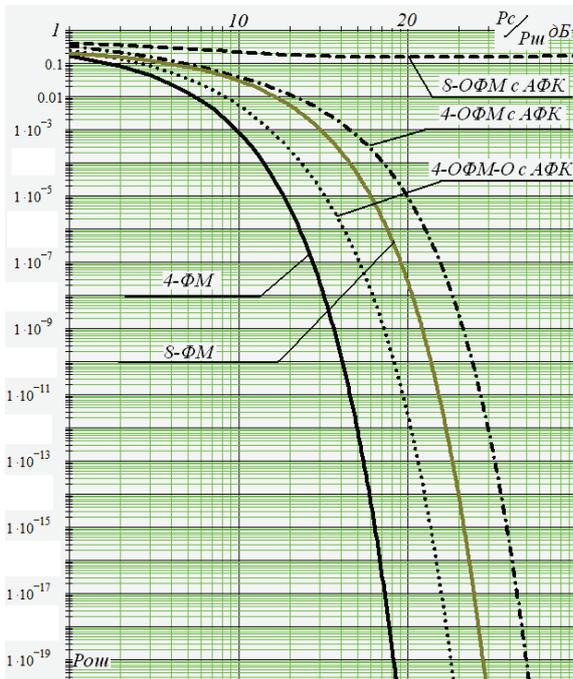


Рис. 6. Зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал/шум при воздействии амплитудно-фазовой конверсии

Анализируя полученные зависимости, можно сделать следующие выводы:

1. Влияние АФК ухудшает помехоустойчивость систем с фазовой модуляцией по сравнению с теоретически возможной.
2. Помехоустойчивость 4-ОФМ-О выше, чем 4-ОФМ, за счёт отсутствия в сигнале фазовых скачков на 180° .

3. Использование 8-ОФМ невозможно, так как значение паразитного фазового сдвига уже выводит сигнальную точку на фазо-амплитудной плоскости за пределы области принятия правильных решений. Причём возникновение несократимой ошибки делает невозможным работу системы связи даже при большом отношении сигнал/шум.

Таблица 4. Значения коэффициента r в зависимости от уменьшения уровня передачи

Уменьшение уровня передачи, $\Delta P_{\text{пл}}$, дБ	Значения коэффициента r в выражении (16)
1	0,8
2	0,71
3	0,67
4	0,56
5	0,5
6	0,44

Проблема снижения помехоустойчивости систем с многопозиционной модуляцией, вызванная АФК, может быть разрешена уменьшением уровня сигнала на выходе радиопередатчика, что автоматически приведёт к переходу в линейный режим работы из режима насыщения и уменьшению абсолютной величины паразитного фазового сдвига. Повторный расчёт может быть произведён по той же методике, причём математически данный процесс отражается введением коэффициента пропорциональности r в выражение из таблицы 4

$$U_{\text{АМ}}(t) = \left(\frac{1 + m \sin \Omega_s t}{1 + m} \right) r \quad (16)$$

Опуская промежуточные расчёты, полученные с помощью выражений (7 – 14), приведём зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал/шум при различном уменьшении уровня передачи для модуляции 8-ОФМ и 4-ОФМ (рисунки 7 и 8 соответственно).

Аналогичные результаты для 4-ОФМ-О не приведены, так как полученные результаты практически совпадают с теоретически возможными.

На основе полученных графиков можно сделать выводы:

1. Уменьшение уровня передачи $\Delta P_{\text{пл}}$ и переход в режим работы с меньшим значением АФК для модуляции 4-ОФМ даёт положительные результаты уже при значениях $\Delta P_{\text{пл}} = 1$ дБ.
2. Уменьшение уровня передачи $\Delta P_{\text{пл}}$ для модуляции 8-ОФМ позволит исключить несократимую ошибку при значениях $\Delta P_{\text{пл}} = 1,5$ дБ.
3. При анализе конкретных систем радиосвязи с использованием графиков, представленных на рисунках 7, 8, следует учитывать ухудшение отношения сигнал/шум на входе приёмника на величину $\Delta P_{\text{пл}}$.

Полученные результаты позволят оценивать степень ухудшения качества связи при передаче фазоманипулированных сигналов с использованием устройств с амплитуд-

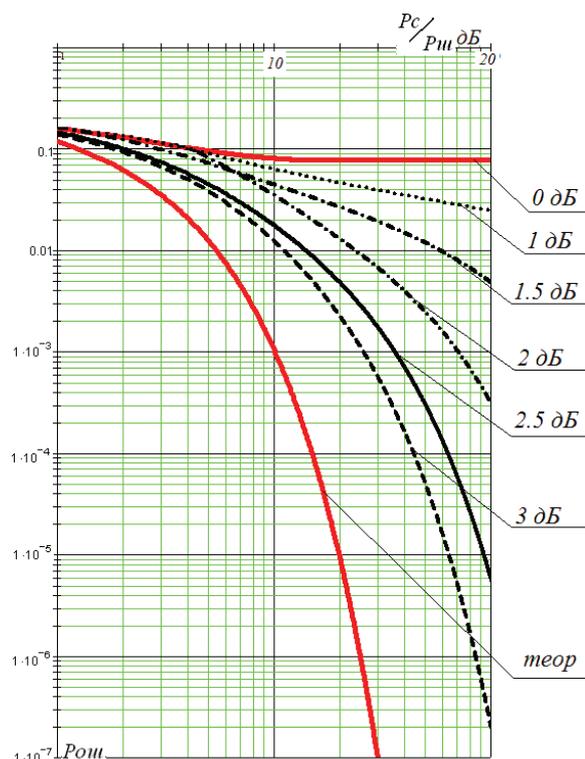


Рис. 7. Зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал/шум при различном уменьшении уровня передачи для модуляции 8-ОФМ

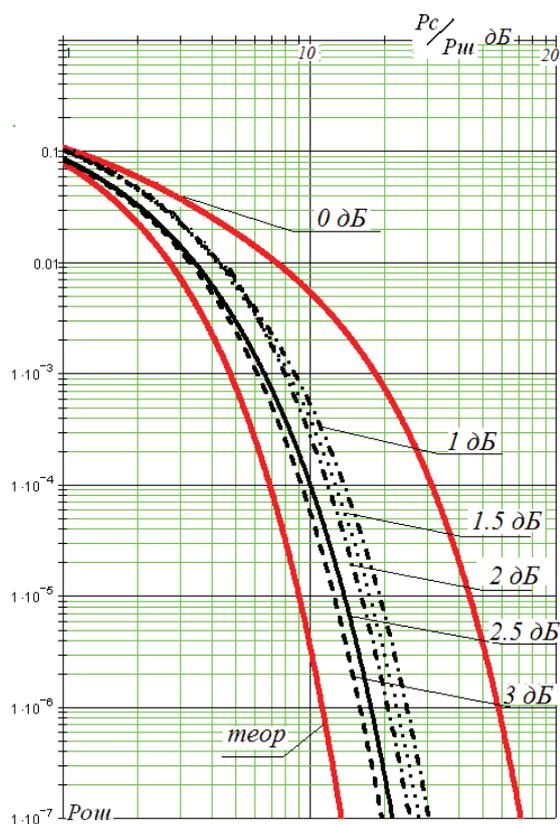


Рис. 8. Зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал/шум при различном уменьшении уровня передачи для модуляции 4-ОФМ

ЛИТЕРАТУРА

1. Банкет В.Л., Дорофеев В.М. Цифровые методы в спутниковой связи. – М.: Радио и связь, 1988. – 240 с.
2. Adaptive Pre- and Post-compensation of Nonlinear Distortions for High-Level Data Modulations, L. Guigno, M. Luise, IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS. – 2004. – №9. – P. 18-24
3. Кокорич М.Г., Носов В.И. Анализ причин ухудшения качества передачи цифровых сигналов по аналоговой РРЛ // Российская НТК «Информатика и проблемы телекоммуникаций», Новосибирск, 2004. – с.179.
4. Кокорич М.Г., Носов В.И. Анализ причин, влияющих на качество передачи цифровых сигналов по стволам аналоговых радиорелейных линий // Международный научно-технический семинар «Перспективы развития средств и систем телекоммуникаций». – Екатеринбург, 2005. – С. 58-64
5. Кокорич М.Г., Носов В.И. Особенности передачи цифровых сигналов по стволам аналоговых радиорелейных линий // Сборник трудов школы-семинара «Современные проблемы радиотехники СПР-2005». – Новосибирск, 2005. – С. 23-26.
6. В.И. Носов, М.Г.Кокорич. Влияние параметров высокочастотного тракта аналоговой радиорелейной линии на качество передачи фазоманипулированного сигнала // Международный научно-технический семинар «Перспективы развития современных средств и систем телекоммуникаций». – Иркутск, 2006. – С. 106-114.
7. Теория передачи сигналов: Учебник для вузов/ А.Г.Зюко, Д.Д.Кловский, – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.
8. Теоретические основы статистической радиотехники / Б. Р. Левин, 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь 1989. – 653с.
9. Носов В.И. Радиорелейные линии синхронной цифровой иерархии. – Новосибирск, 2003. – 159 с.

Носов Владимир Иванович

д.т.н., профессор кафедры систем радиосвязи СибГУТИ,
(630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86)
тел. (383) 269-82-54, e-mail: nvi@neic.nsk.su

Кокорич Марина Геннадьевна

ст. преподаватель кафедры систем радиосвязи СибГУТИ,
(630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86)
тел. (383) 269-82-54, e-mail: kokorich@mail.ru

но-фазовой конверсией, которая характерна для радиопередатчиков радиорелейных и спутниковых линий связи.