

УДК 621.396.97

## ИСКАЖЕНИЯ ПРИЁМА В СИНХРОННОЙ ВЕЩАТЕЛЬНОЙ СЕТИ АНАЛОГОВЫХ И ЦИФРОВЫХ ПЕРЕДАТЧИКОВ

ВЫХОДЕЦ А.В., ВЫХОДЕЦ А.А.

Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова  
ГП “Український науково-дослідницький інститут радіо і телебачення”

## DISTORTION OF SIGNAL RECEPTION IN SYNCHRONOUS BROADCASTING NETWORK OF ANALOG AND DIGITAL TRANSMITTERS

A.V. VYKHODETS, A.A. VYKHODETS

Odessa National Academy of Telecommunications n.a. O.S. Popov  
SE “Ukrainian Scientific-Research Institute of Radio and Television”

**Аннотация.** Произведен сравнительный анализ искажений приема в синхронной аналоговой сети АМ передатчиков и в синхронной сети цифровых DRM передатчиков.

**Abstract.** A comparative analysis distortion of reception in analog synchronous network of AM transmitters and in synchronous network DRM transmitters.

### ВВЕДЕНИЕ

При работе вещательных передатчиков в синхронной сети между зонами хорошего приема, как и при их работе в совмещенном частотном канале, образуются зоны искажений [1, 2]. В системах синхронного вещания эти искажения имеют особый, специфический характер.

Рассматриваются условия образования зоны искажений на территории между двумя синхронными аналоговыми и цифровыми передатчиками с учетом размеров этой зоны.

### АНАЛОГОВАЯ СЕТЬ ПЕРЕДАТЧИКОВ

Рассмотрим работу двух синхронных АМ передатчиков  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ , несущие которых модулированы по амплитуде тональным сигналом  $U_m \cos \Omega t$ . В месте приема, находящемся на расстоянии  $r_1$  от передатчика  $\Pi_1$  и  $r_2$  от передатчика  $\Pi_2$  напряжения на входе приемника от каждого из передатчиков могут быть представлены в виде

$$\begin{aligned} u_1 &= U_1(1 + m \cdot \cos \cdot \Omega t) \cos \omega t, \\ u_2 &= U_2[1 + m \cdot \cos \cdot \Omega(t - \tau)] \cos \omega(t - \tau) \end{aligned} \quad (1)$$

Сумма радиосигналов на входе приемника

$$u = u_1 + u_2 = U_1[(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega t, + D [1 + m \cos \Omega(t - \tau)]] \cos \omega(t - \tau), \quad (2)$$

где  $U_1, U_2$  – амплитуды несущих колебаний передатчиков  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ ;  $m$  – коэффициент АМ;  $D = U_2 / U_1$  – отношение амплитуд напряжения радиосигналов на входе приёмника,  $\tau = \frac{|r_2 - r_1|}{c}$  – разность времени пробега электромагнитных волн к месту приёма от  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ ;  $c$  – скорость света.

Результирующее напряжение на входе приёмника

$$u = u_1 + u_2 = U_p \cdot \cos[\omega t - \psi(t)], \quad (3)$$

где  $\omega t$  – разность фаз несущих колебаний.

При отсутствии модулирующих сигналов ( $m = 0$ ) амплитуда суммарного напряжения (3) на входе приемника

$$U_p = U_1 \sqrt{1 + 2D \cos \omega\tau + D^2} \quad (4)$$

Если поместить приемник на участке территории, где амплитуды напряжения на входе приёмника  $U_1$  и  $U_2$  одинаковы ( $D \approx 1$ ), то как следует их выражения (4)

$$U_p = U_1 \sqrt{2[1 + \cos(\omega\tau)]} = 2U_1 \left| \cos \frac{\omega\tau}{2} \right|. \quad (5)$$

При перемещении приёмника на расстояние  $\Delta r$  по направлению, например, к передатчику  $\Pi_1$  расстояние от места приёма до передатчика равно  $r_1 - \Delta r$ , а до передатчика  $\Pi_2 - r_2 + \Delta r$ . Разность изменится на величину  $2\Delta r$  и амплитуда результирующего напряжения

$$U_p = 2U_1 \left| \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r \right|.$$

Как видно из выражения (5) при абсолютной синхронизации несущих передатчиков ( $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ ) в пространстве между станциями в результате интерференции электромагнитных волн образуется стоячая волна с пучностями и узлами. Узлы и пучности будут чередоваться с интервалом равным половине длины волны несущего колебания  $\lambda/2$ . Например, при значении несущей частоты  $f = 1$  МГц узлы и пучности будут иметь протяженность по 150 В пучности амплитуда результирующего напряжения при  $D = 1$   $U_{p \max} = 2U_1$ , в узле  $U_{p \min} = 0$ . При перемещении приемника к одному из передатчиков  $D$  уменьшается, в связи с чем увеличивается значение  $U_{p \min}$  и уменьшается  $U_{p \max}$ .

При планировании синхронных сетей в случае небольших значений задержек модулирующих сигналов в каналах подачи программ возможно использование значений защитного отношения по радиочастоте  $A = \lg(1/D) = 6-4$  [31].

При синхронизации несущих и подаче программ на передатчики со спутника защитное отношение может быть снижено до 0-1 дБ.

Определим значение напряжение на входе приемника при указанных значениях защитного отношения. Как следует из выражения (4) в узлах стоячих волн  $\omega\tau = n\pi$  и

$$U_p = U_1(1 - D) \quad (6)$$

Поскольку напряжение сигнала на входе приёмного устройства пропорционально напряжённости электрического поля, значение  $D$  можем рассматривать и как отношение амплитуд напряжённостей полей, создаваемых первым  $E_1$  и вторым  $E_2$  передатчиками  $D = \frac{E_1}{E_2}$  [3, 4]. При  $A = 4$  дБ

( $D = 0,63$ ),  $U_p = 0,37 U_1$  (напряжённость поля на входе приёмника снижается на 8,6 дБ)

При  $A = 6$  дБ ( $D = 0,5$ ),  $U_p = 0,5 U_1$  (напряжённость поля снижается на 6 дБ)

При  $A = 1$  дБ ( $D = 0,89$ ),  $U_p = 0,11 U_1$  (напряжённость поля снижается на 19 дБ)

Из опыта прослушивания программ АМ-СВ вещания известно, что при снижении напряжённости поля на 8-10 дБ субъективно воспринимаемое качество звуковоспроизведения снизится незначительно. При понижении на 20 дБ увеличится зашумленность звука и уменьшение качества вещания будет хорошо заметно.

Определим, как зависит уровень напряженности поля от значения параметра  $D$  (расстояния от точки, в которой  $D = 1$ ).

Напряжённость поля, создаваемая передатчиком  $\Pi_1$  в точке, расположенной на расстоянии  $r_1$  (рис.1) от передатчика, будет равна:

$$E(r_1) = \frac{BP_\Sigma}{r_1} \text{ дБ(мкВ/м)}. \quad (7)$$

где  $P_{\Sigma}$  – эффективная излучаемая мощность передатчика, дБ/кВт;  $B$  – постоянная величина.

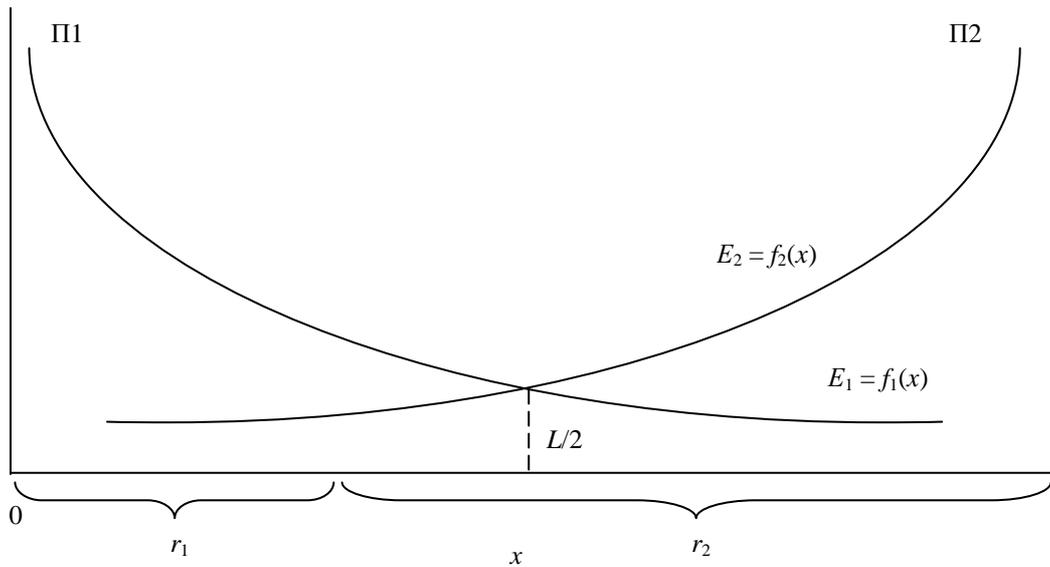


Рисунок 1 – Зависимости напряженности поля от расстояния между передатчиками

От передатчика П2 рассматриваемая точка приема находится на расстоянии  $r_2$ . Расстояние между передатчиками П1 и П2  $L=100$  км, и  $r_2 = L - r_1$  (рис. 1). Напряженность поля, создаваемая передатчиком П2 в точке приема, равна

$$E(L - r_1) = \frac{BP_{\Sigma}}{L - r_2} \text{ дБ(мкВ/м)} \quad (8)$$

Соотношение амплитуд напряженностей полей (6) и (7), создаваемых двумя передатчиками с одинаковыми значениями эффективной излучаемой мощности в точке приема на расстоянии  $r_1$  от П1 и  $L - r_1$  от П2

$$D(r_1) = \frac{E(L - r_1)}{E(r_1)}. \quad (9)$$

Введём относительную величину  $x = \frac{r_1}{L}$ , которая на рассматриваемом участке территории от 0 до  $L/2$  (рис.1) будет изменяться в пределах от 0 до 0,5. Перейдя от  $D(r_1)$  (9) к  $D(x)$ , получим:

$$D(x) = \frac{x}{1 - x} \quad (10)$$

Выразим через переменную  $x$  разность времени распространения сигналов от передатчиков к приемнику:

$$\tau(x) = \frac{(L - r_1) - r_1}{c} = \frac{L(1 - 2x)}{c}. \quad (11)$$

На рис. 2 приведена зависимость  $D(x)$  (10) и  $\tau(x)$  (11) от координаты  $x$ .

Как видно из рис.2 снижение напряжённости поля в узлах стоячих волн на 8 дБ будет происходить на расстоянии 20 км по отношению к точке территории в которой напряженности  $E_1 = E_2$  ( $D=1$ ). Снижение напряженности поля на 19 дБ будет наблюдаться на расстоянии 7 км. Приведенные значения защитных отношений относятся только к условиям стационарного приёма.

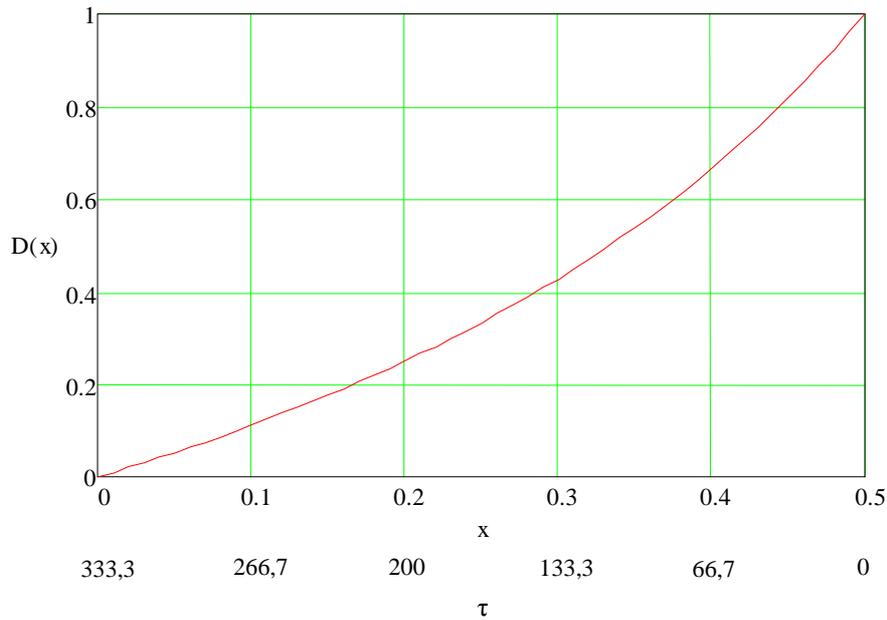


Рисунок 2 – Зависимость  $D(x)$  и  $\tau(x)$  от координаты  $x$

При планировании синхронных сетей стремятся зону искажений разместить на участках территории с малой плотностью населения. Однако при неподвижной картине стоячих волн владелец стационарного приемника при ухудшении качества приема в отдельных случаях имеет возможность разместить антенну в районе пучности. Кроме того, учитывая, что узлам напряженности электрического поля соответствует пучность магнитного поля, улучшить качество приема можно при подключению к приемнику магнитную антенну. Это обеспечит ему радиоприем с нормальным качеством. При мобильном приёме на расстоянии 7...10 км от точки, в которой  $D = 1$ , периодически прием будет осуществляться с заметным ухудшением качества. При дальнейшем удалении от этой точки качество приема постепенно повышается.

Следует отметить, что нормы защитных отношений принимались в 1960 годах и не учитывали ни условий мобильного приема, ни приема на переносные приемники.

### СЕТЬ ЦИФРОВЫХ ПЕРЕДАТЧИКОВ

Рассмотрим особенности радиоприема сигналов в синхронной сети двух передатчиков  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  цифровой системы DRM [5]. Мощности обоих передатчиков одинаковы, расстояние между ними  $L = 100$  км

Сигнал OFDM на интервале  $(0, T_s)$

$$G(t) = U_0 \sum_{k=0}^{N-1} (C_{Ik} \cos 2\pi k F t - C_{Qk} \sin 2\pi k f t) . \quad (12)$$

На выходе цифрового передатчика при передаче однополосного колебания получим

$$u_{\text{ц}} = a U_{01} \sum_{k=0}^{N-1} (C_k \cos [2\pi(kF + f_R)t - \psi_k] , t_1 \leq t \leq t_1 + l T_s , \quad (13)$$

где  $t_1$  – произвольный момент начала передачи;

$l$  – число переданных посылок;

$T_s$  – продолжительность символа OFDM;

$N$  – число каналов;

$T_U$  – продолжительность полезной (ортогональной) части символа OFDM;

$F = \frac{1}{T_U}$  – основная частота OFDM символа;

$C_k = \sqrt{C_{Ik}^2 + C_{Qk}^2}$ ,  $\psi_k = \arctg \frac{C_{Qk}}{C_{Ik}}$ ,  $aU_0$  – коэффициент передачи цифрового канала;

$f_R$  – несущая частота АМ

Когда на вход DRM приемника поступают сигналы от двух синхронных передатчиков, имеющих между собой временной сдвиг  $\tau$ , то результирующий сигнал равен их сумме

$$u_{\Sigma} = u_1(t) + u_2(t) = U_{01} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} C_k \cos[2\pi(kF + f_R)t - \psi_k] + DU_{02a} \sum_{k=0}^{N-1} C_k \cos[2\pi(kF + f_R)(t - \tau) - \psi_k] \right\}. \quad (14)$$

Рассмотрим результат суммирования двух составляющих суммарного сигнала с частотой  $(f_R + kF)$

$$\begin{aligned} aU_{0a} \{ C_k \{ \cos[2\pi(kF + f_R)t - \psi_k] + D \cos[2\pi(kF + f_R)t - 2\pi kF\tau - 2\pi f_R\tau - \psi_k] \} = \\ = M_k C_k \cos[2\pi(kF + f_R)t - \psi_k - \gamma_k], \end{aligned} \quad (15)$$

где  $M_k = \sqrt{1 + D^2 + 2D \cos \varphi_k}$ , (16)

$$\varphi_k = 2\pi t(f_R + kF), g_k = -\arctg \frac{D \sin \varphi_k}{1 + D \cos \varphi_k}, D = \frac{U_{02}}{U_{01}}.$$

Результирующий суммарный сигнал OFDM будет равен

$$u_{\Sigma} = \sum_{k=0}^{N-1} B_k \cos[2\pi(kF + f_R)t + \Phi_k], \quad (17)$$

где  $B_k = aU_{01} M_k C_k$ ,  $\Phi = -\psi_k - \gamma_k$ .

Из сравнения (17) и (13) видно, что выражения совпадают и суммарный сигнал (17) может быть принят так же, как и исходный (13).

Таким образом, в системе передачи цифровых сигналов (OFDM), когда задержка во времени не превышает длительности защитного интервала, имеет место конструктивное эффективное взаимное сложение сигналов от каждого передатчика сети. Однако, хотя использование защитного интервала и устраняет межсимвольные помехи в условиях синхронной работы передатчиков, они не позволяют устранить влияния частотно-избирательного замирания.

Проанализируем выражение  $M_k$  при изменении  $D$  от 0 до 1.

Как видно из (16), в случае, когда  $D$  изменяется в интервале (1, 0), в зависимости от значения фазы  $\varphi_k$  коэффициент  $M_k$  может изменяться в интервале от 0 до 2. Это означает, что из-за частотно-избирательных замираний некоторые частотные диапазоны спектра принимаемого сигнала будут ослаблены, происходит искажение амплитуды и фазы каждой несущей. Если приемник OFDM должен выполнить когерентную демодуляцию сигнала, ему требуется выполнить коррекцию фазы и амплитуды каждой несущей. После быстрого преобразования Фурье эта задача решается с помощью простого корректора (эквалайзера) [5]. Такой процесс носит название “оценка и коррекция канала”. Для оценки канала и, как следствие, для коррекции сигналов КАМ используется набор специальных пилот-несущих, разбросанных в частотной и временной области, в сочетании с интерполяционной фильтрацией для оценки характеристики канала.

Коэффициент  $M_k$  принимает значения равное 0 в окрестности точки, в которой  $D = 1$ . На этом отрезке территории происходит срыв приема сигналов DRM при перемещении приемника на расстояние равное  $(2n - 1) \frac{\lambda}{2}$  м. При частоте несущего колебания 1 МГц срыв приема будет происходить через каждые 150 м.

При  $\varphi_k = n\pi$  выражение коэффициента  $M_k$  будет иметь вид подобный выражению (6):  $M_k = 1 - D$ . При полосе 10 кГц, которую занимает многоканальный сигнал (17), верхняя частота этого сигнала  $kF_B$  также будет равна 10 кГц. При несущей частоте  $f_R = 1$  МГц максимальное значение суммарной частоты будет равно  $f = kF_B + f_R = 1,01$  МГц. Таким образом все частоты многоканального сигнала, практически, будут иметь фазовый сдвиг  $\varphi_k = \frac{\pi\tau f}{2}$  при  $\tau = 2n10^{-6}$ .

Как показано выше, при перемещении приемника от точки, в которой  $D=1$  к одному из передатчиков значение  $D$  будет уменьшаться. В том случае, когда напряженность поля на границе зоны обслуживания передатчика ( $E_1 = E_2$ ) будет равна пороговому значению, в узлах поля стоячих волн при уменьшении напряженности поля на 0,5 дБ поля будет наблюдаться срыв приема. В этом случае зона искажений будет практически равной зоне обслуживания.

Для уменьшения зоны искажений напряженность поля каждого передатчика на границе зоны обслуживания должна быть, по крайней мере, на 30 дБ больше порогового значения. В этом случае, на расстоянии примерно 2 км от точки, в которой ( $E_1 = E_2$ ) значение  $D = 0,965$ ,  $M_k = -29,2$  дБ (мкВ/м). Результирующее значение напряженности поля  $E = -29,2+30=0,8$  дБ. Таким образом, на этом расстоянии напряженность поля в узле будет на 0,8 дБ выше порогового значения и срыв приема в узлах поля наблюдаться не будет. Зона искажений в этом случае будет примерно равна 4 км, т.е. значительно меньше.

## ВЫВОДЫ

В синхронной передающей сети в результате интерференции несущих колебаний образуется область стоячих волн поля. При синхронизации передатчиков сигналами GPS и подаче программ на передатчики со спутника стоячие волны поля будут неподвижны относительно территории. Учитывая то, что в узлах стоячих волн на границе зоны обслуживания напряженность значительно меньше, чем в пучности при аналоговом мобильном приеме качество приема будет периодически ухудшаться. При удалении от этого участка качество приема улучшается.

В синхронной сети цифровых передатчиков DRM при значении используемой напряженности поля на границе зоны обслуживания равной минимальной (пороговой) срыв приема в пределах узлов стоячих волн поля будет наблюдаться практически на протяжении всей зоны обслуживания. В этих условиях качественный мобильный прием вследствие срыва приема в пределах узлов поля будет невозможен на протяжении зоны обслуживания. Для уменьшения зоны искажений необходимо увеличить напряженность поля на границе зоны обслуживания, по крайней мере, на 30 дБ. В этом случае ухудшение мобильного приема будет происходить только на протяжении нескольких километров.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Выходец А.В. Звуковое вещание: Справочник / А.В. Выходец, М.П. Жмурин, И.Ф. Зорин и др.; под ред. проф. Ю.А. Ковалгина. – М.: Радио и связь, 1993. – 464 с.
- 2 Выходец А.В. Справочник по радиовещанию / А.В. Выходец, В.М. Захарин и др.; Под ред. А.В. Выходца. – К.: Техніка, 1981. – 263 с.
- 3 Гейнце С.С. Синхронное радиовещание / С.С. Гейнце, Г.Я. Тимофеева, А.А. Пирогов и др.; под ред. проф. А.А. Пирогова. – М.: Радио и связь, 1989. – 160 с
- 4 Выходец А.В. Аналоговое и цифровое радиовещание / А.В. Выходец, С.Н. Ганжа, А.С. Кузнецова, А.А. Выходец; Под ред. проф. А.В. Выходца. – Одесса: ВМВ, 2011. – 312 с.
- 5 ETSI EN 201 980 V3.1.1 (2009 - 08) Digital Radio Mondiale (DRM) System Specification.