

**Косинусные меандровые
шумоподобные сигналы
(CosBOC-сигналы)
в спутниковых
радионавигационных системах
нового поколения**

М.С. Ярлыков, В.В. Важинский
ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина

Москва, ноябрь 2009

Использование меандровых ШПС (ВОС-сигналов) в СРНС нового поколения:

- модернизированная GPS:
 - Block IIR-M, серия состоит из 8 спутников, начиная с Block IIR-(14)M (запуск 26.09.2005) и заканчивая Block IIR-(21)M (запуск 17.08.2009);
 - Block IIF;
 - Block III (GPS-III).
- Galileo (опытные спутники):
 - GIOVE-A (запуск 28.12.2005);
 - GIOVE-B (запуск 27.04.2008);
 - IOV Satellites (запуск 4-х спутников планируется в 2010 году).
- QZSS (запуск спутника планируется в скором времени).

Применяемые в настоящее время МШПС –
в большинстве Sin МШПС (SinВОС-сигналы)

Требования к многорежимности и электромагнитной совместимости (ЭМС), а также внедрение сложных МШПС (например, AltВОС-сигналов) ведут к росту потребности в использовании (наряду с Sin МШПС) Cos МШПС (CosВОС-сигналов).

Косинусные МШПС представляют собой ШПС, у которых каждый расширяющий спектр символ (элемент, чип) ПСП дальномерного кода представляет собой косинусный меандровый символ (МС).

Косинусный МС определяется как некоторый отрезок косинусного меандрового колебания заданной длительности, содержащий какое-либо одинаковое число меандровых импульсов.

GALILEO Signals

E5A Signal:

Data+Pilot
BPSK mod.
 $R_c=10.23$ Mcps
 $R_s=50$ sps
OS/CS/SOL
Services

E5B Signal:

Data+Pilot
BPSK mod.
 $R_c=10.23$ Mcps
 $R_s=250$ sps
OS/CS/SOL
Services

E6P Signal:

BOCcos(10,5) mod.
 $R_c=5.115$ Mcps
PRS Service

E6C Signal:

Data + Pilot
BPSK mod.
 $R_c=5.115$ Mcps
 $R_s=1000$ sps
CS Service

L1P Signal:

BOCcos(15,2.5) mod.
PRS Service

L1F Signal:

Data + Pilot
BOC(1,1) mod.
 $R_c=1.023$ Mcps
 $R_s=250$ sps
OS/CS/SOL
Services

90×1.023 MHz

40×1.023 MHz

40×1.023 MHz

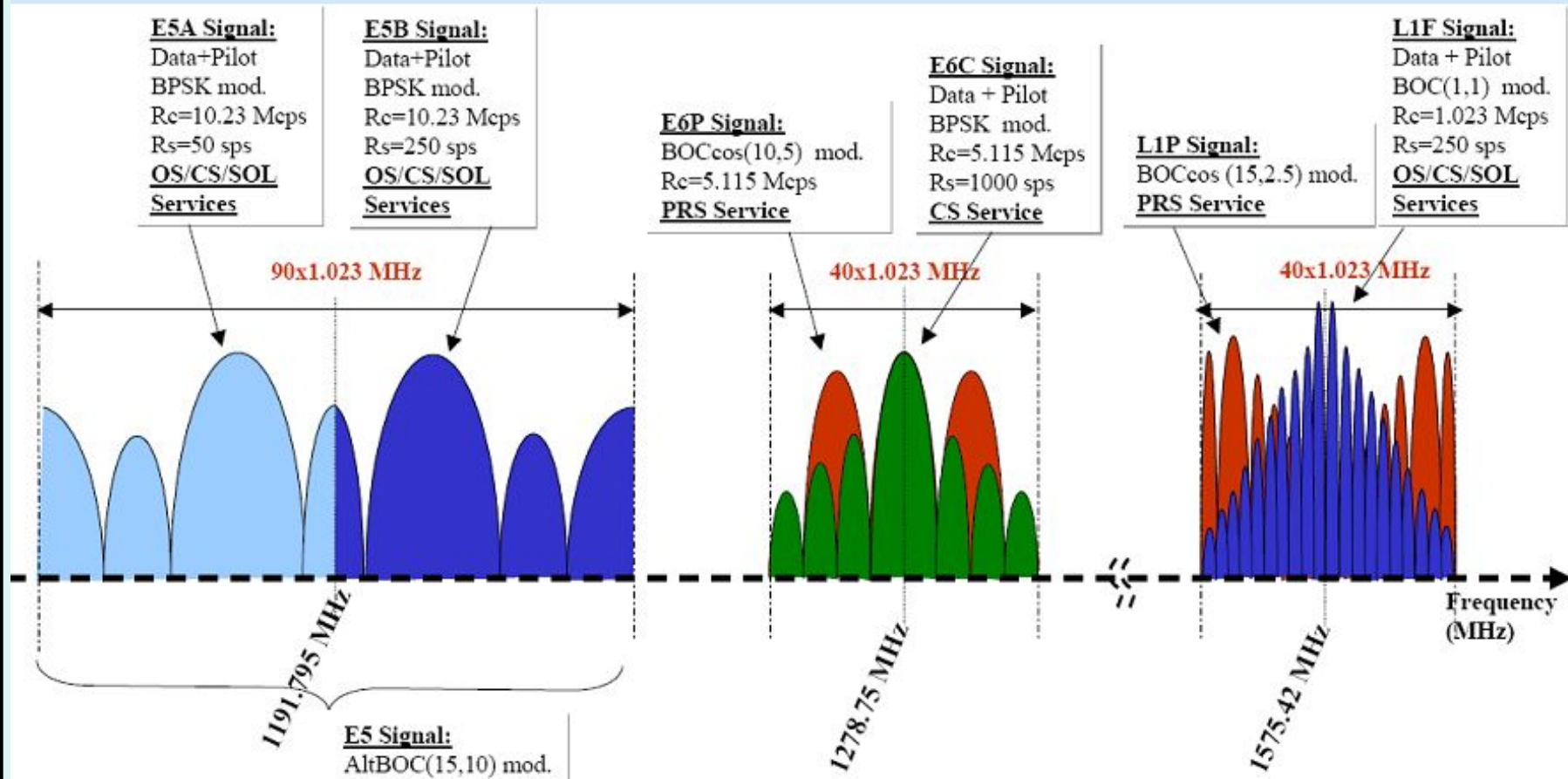
1191.795 MHz

1278.75 MHz

1575.42 MHz

E5 Signal:
AltBOC(15,10) mod.

Frequency
(MHz)



Примеры косинусных МШПС (СРНС Galileo)

1. PRS–сигналы (сигналы с санкционированным доступом, предназначенные для правительственных служб) диапазона E6 на $f_H=1278,75$ МГц с косинусной меандровой модуляцией типа CosBOC(10, 5) при $N_M=4$;
2. PRS–сигналы диапазона L1 на $f_H=1575,42$ МГц с косинусной меандровой модуляцией типа CosBOC(15, 2.5) при $N_M=12$;
3. AltBOC–сигналы диапазона E5 на $f_H=1191,795$ МГц с меандровой модуляцией типа AltBOC(15, 10) при $N_M=3$;

Модулирующая функция AltBOC–сигнала $d_{\text{AltBOC}}(t)$ имеет вид:

$$d_{\text{AltBOC}}(t) = d_{\text{cosBOC1}}(t) + jd_{\text{sinBOC2}}(t).$$

У AltBOC–сигнала синфазная компонента $d_{\text{cosBOC1}}(t)$ определяет косинусную МПСП, а квадратурная компонента $d_{\text{sinBOC2}}(t)$ – синусную МПСП. Косинусная и синфазная МПСП в AltBOC–сигнале содержат различную информацию.

Математические модели косинусных меандровых ШПС (CosVOC–сигналов)

$$s(t - t_0) = Ad(t - t_0) \cos[\omega_0(t - t_0) + \varphi(t)] \quad (1)$$

– МШПС с двоичной ФМ, где

$$d(t - t_0) = g(t - t_0)r(t - t_0) \quad (2)$$

– МПСП дальномерного кода (модулирующая функция);

$$g(t - t_0) = \sum_{k=0}^{L-1} v_k \text{rect}_c[t - k\tau_c - t_0] \quad (3)$$

– собственно ПСП дальномерного кода;

$$r_{\sin}(t) = \text{sign}[\sin \omega_m t] \quad (4)$$

– поднесущее синусное меандровое колебание;

$$r_{\cos}(t) = \text{sign}[\cos \omega_m t] \quad (5)$$

– поднесущее косинусное меандровое колебание;

$$\omega_m = 2\pi f_m; f_m = \frac{1}{T_m}; T_m = 2\tau_m; f_m = \frac{1}{2\tau_m} \quad \text{– частота поднесущего меандрового колебания;}$$

τ_m – длительность меандрового импульса;

τ_c – длительность символа (элемента, чипа) ПСП;

$$k = 0, 1, 2, \dots, (L - 1); v_k = \pm 1; T_L = L\tau_c; f_c = \frac{1}{\tau_c} \quad \text{– частота следования символов;}$$

L – количество символов на периоде ПСП.

Типы косинусной меандровой модуляции

7

$\text{CosBOC}(f_m, f_c)$ или $\text{CosBOC}(\alpha, \beta)$,

где $\alpha = \frac{f_m}{f_{оп}}$, $\beta = \frac{f_c}{f_{оп}}$, $f_{оп}$ - опорная частота;

Примеры косинусных МШПС (система Galileo)

1. PRS-сигналы диапазона E6 с косинусной меандровой модуляцией типа $\text{CosBOC}(10, 5)$, где
 $f_{оп} = 1,023 \text{ МГц}$; $f_m = 10 f_{оп} = 10,23 \text{ МГц}$; $f_c = 5 f_{оп} = 5,115 \text{ МГц}$.
2. PRS-сигналы диапазона L1 с косинусной меандровой модуляцией типа $\text{CosBOC}(15, 2.5)$, где
 $f_{оп} = 1,023 \text{ МГц}$; $f_m = 15 f_{оп} = 15,345 \text{ МГц}$; $f_c = 2,5 f_{оп} = 2,5575 \text{ МГц}$.

Обобщенный параметр МШПС:

$$N_m = \frac{\tau_c}{\tau_m} = \frac{2f_m}{f_c} = \frac{2\alpha}{\beta} \quad (6)$$

- коэффициент кратности меандровых импульсов в символе МПСР.

Формирование косинусной МПСП $d_{\cos}(t)$

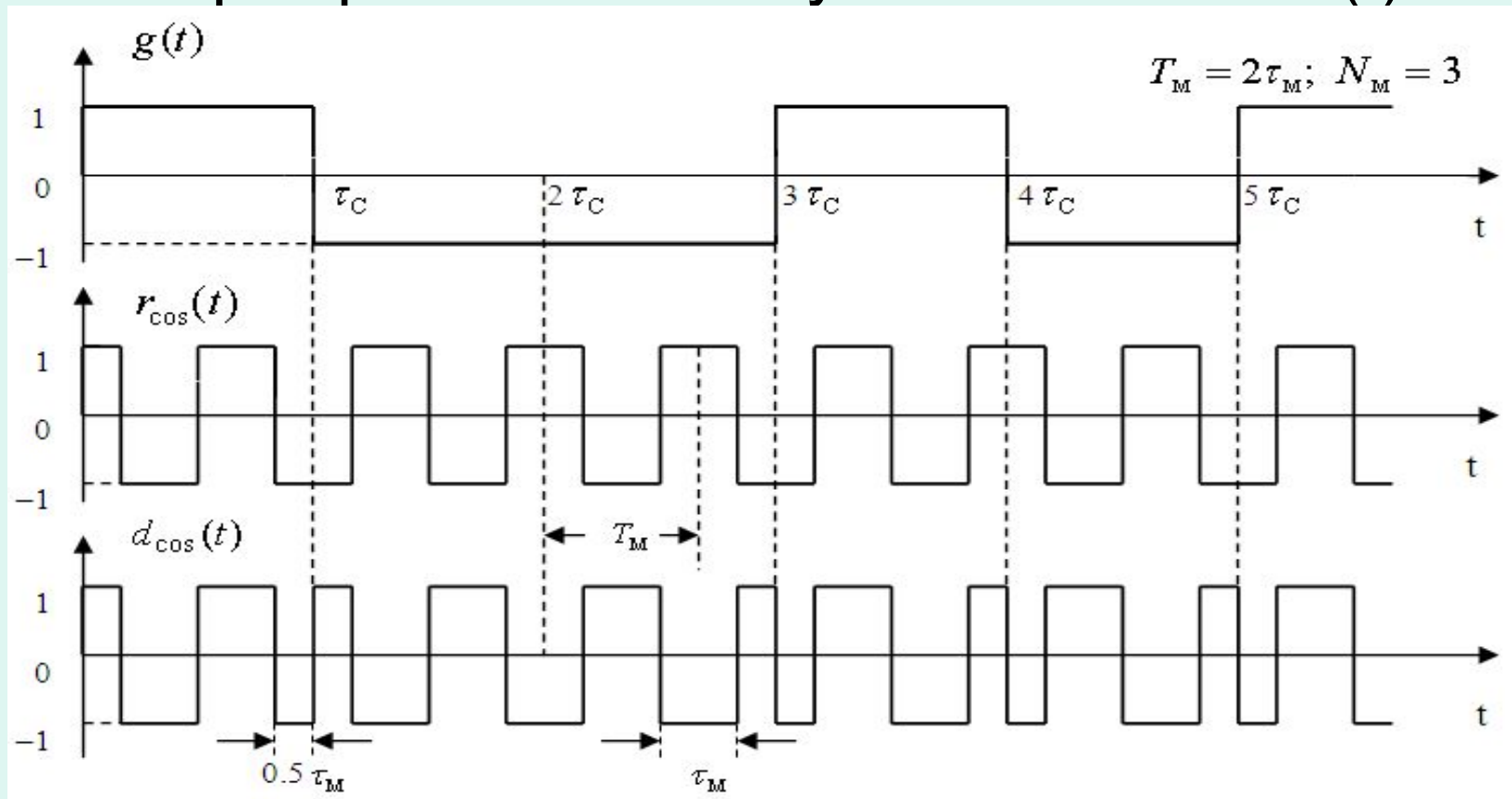


Рисунок 1

Косинусный МС:

$$\mu_{\cos C N_M}(t) = \text{rect}_{0,5\tau_M}[t] + \sum_{m=1}^{N_M-1} (-1)^m \text{rect}_{\tau_M}[t - (m - 0,5)\tau_M] + (-1)^{N_M} \text{rect}_{0,5\tau_M}[t - (N_M - 0,5)\tau_M]. \quad (7)$$

Графики типовых косинусных МС

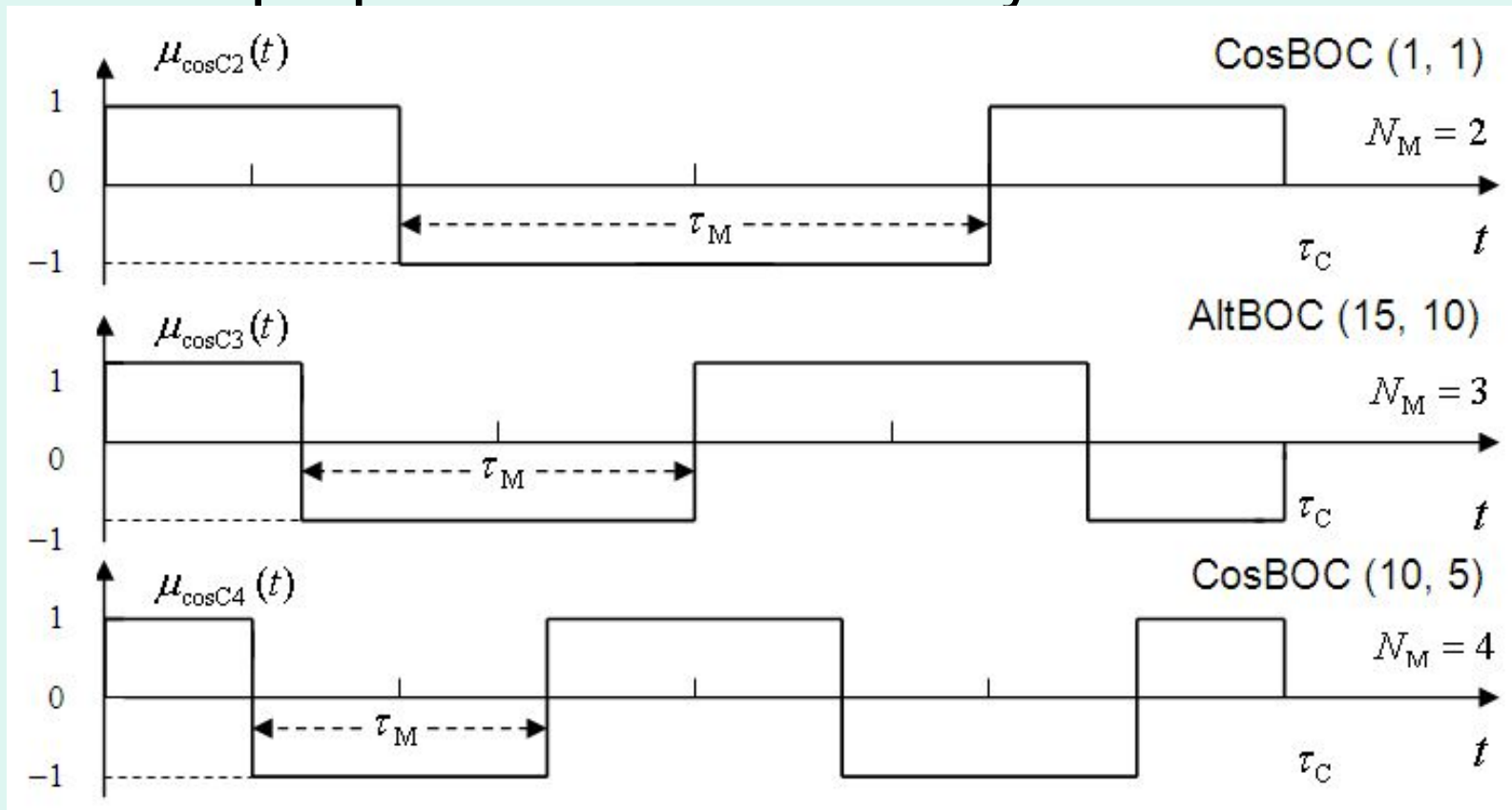


Рисунок 2

Косинусный МС может быть определен как произведение двух синусных МС применительно к частотам поднесущего меандрового колебания f_M и $2f_M$.

$$\mu_{\cos C N_M}(t) = \mu_{\sin C(N_M)}(t) \cdot \mu_{\sin C(2N_M)}(t) \quad (8)$$

Формирование косинусного МС в случае CosBOC(15, 2.5)-сигналов

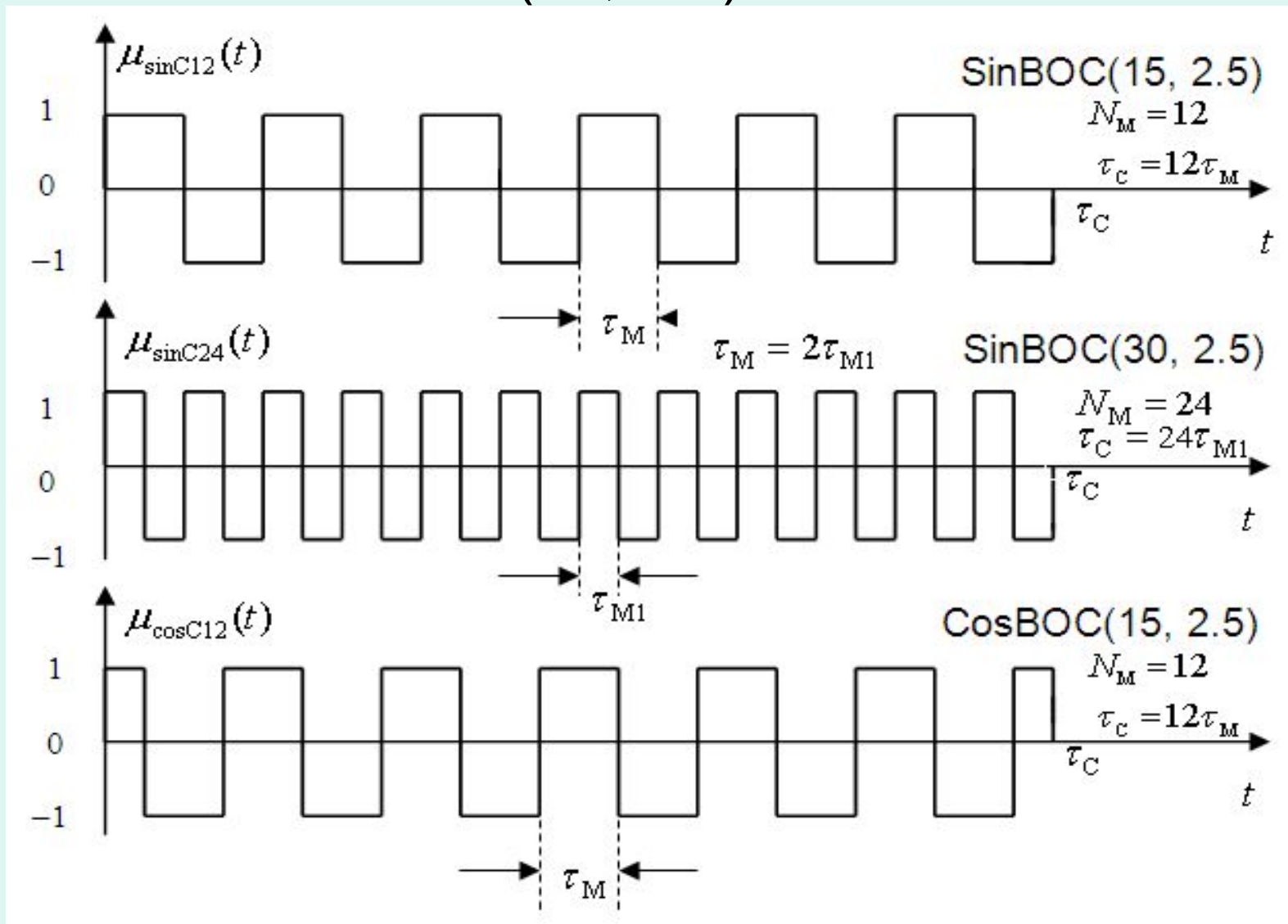


Рисунок 3

Энергетические спектры одиночных косинусных МПСП дальномерного кода

1
1

$$S_{d_{\cos}}(\omega) = \frac{1}{T_L} |G_{\cos}(\omega)|^2 = \frac{1}{L} S_{\cos}(\omega) |H(\omega)|^2, \quad (9)$$

где $G_{\cos}(\omega)$ – спектральная плотность одиночной косинусной МПСП;

$S_{\cos}(\omega)$ – энергетический спектр одиночного символа $\mu_{\cos} C_{N_m}(t)$ МПСП;

$H(\omega)$ – амплитудный спектр последовательности кодовых коэффициентов $\{v_k\}$;

T_L – длительность периода МПСП;

L – число косинусных МС на периоде МПСП.

Энергетические спектры одиночных символов 12 косинусных МПСД дальномерного кода

$$S_{\cos}(\omega) = \frac{1}{\tau_c} |F_{\cos}(\omega)|^2, \quad (10)$$

где

$$F_{\cos}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \mu_{\cos C N_M}(t) e^{-j\omega t} dt \quad (11)$$

– спектральная плотность косинусного МС $\mu_{\cos C N_M}$.

Согласно (8), (10) и (11) для различных значений N_M имеем:

$$S_{\cos}(f) = \begin{cases} \frac{1}{f_c} \left[\frac{2 \sin\left(\frac{\pi f}{f_c}\right) \cdot \sin^2\left(\frac{\pi f}{2N_M f_c}\right)}{\left(\frac{\pi f}{f_c}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi f}{N_M f_c}\right)} \right]^2 & \text{при } N_M - \text{ чётном } (N_M = 2, 4, 6, \dots); \\ \frac{1}{f_c} \left[\frac{2 \cos\left(\frac{\pi f}{f_c}\right) \cdot \sin^2\left(\frac{\pi f}{2N_M f_c}\right)}{\left(\frac{\pi f}{f_c}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi f}{N_M f_c}\right)} \right]^2 & \text{при } N_M - \text{ нечётном } (N_M = 3, 5, 7, \dots). \end{cases} \quad (12)$$

Графики энергетического спектра $S_{\cos}(f)$ одиночного символа косинусной МПСП при $N_M = 2$

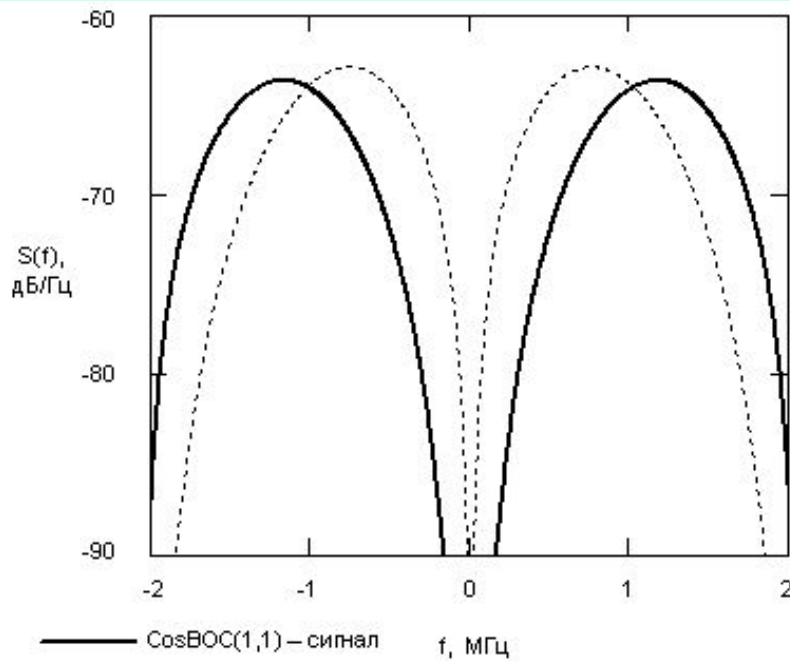


Рис.4а

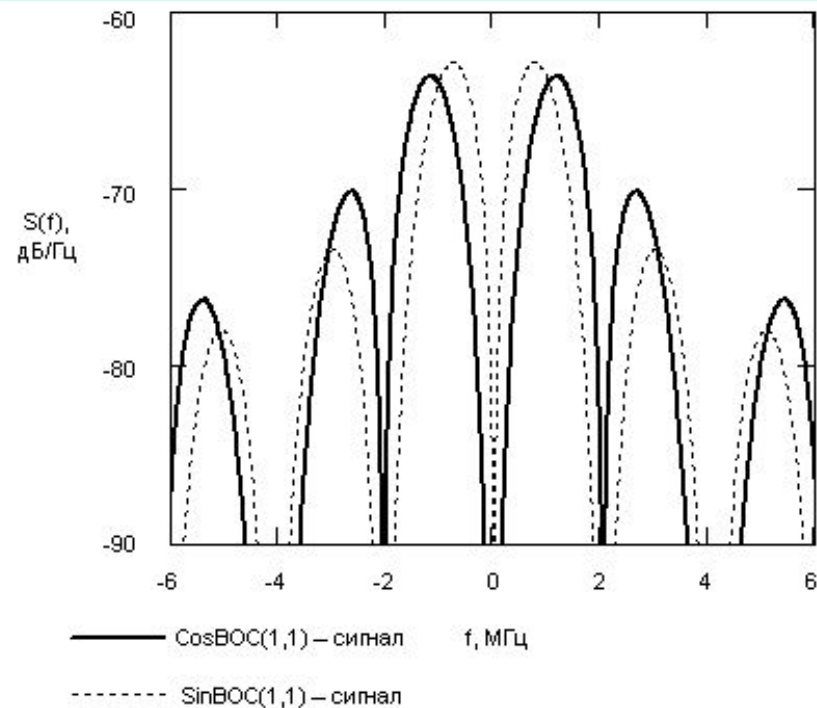


Рис.4б

Для сравнения на рисунках пунктиром показаны графики энергетического спектра $S_{\sin}(f)$ одиночного символа соответствующей синусной МПСП.

Графики энергетического спектра $S_{\cos}(f)$ одиночного символа косинусной МПСП при $N_M = 3$

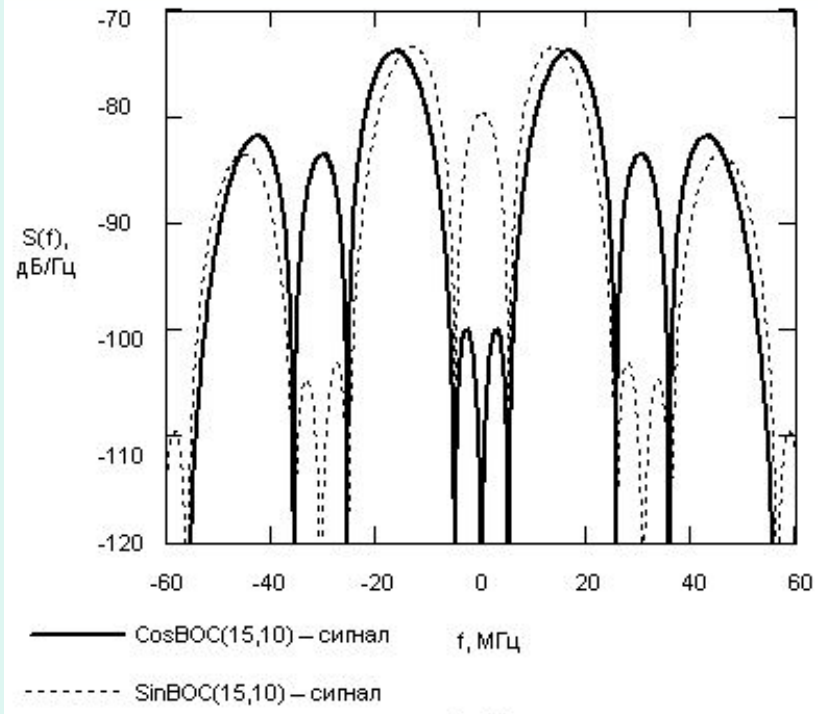


Рис.5а

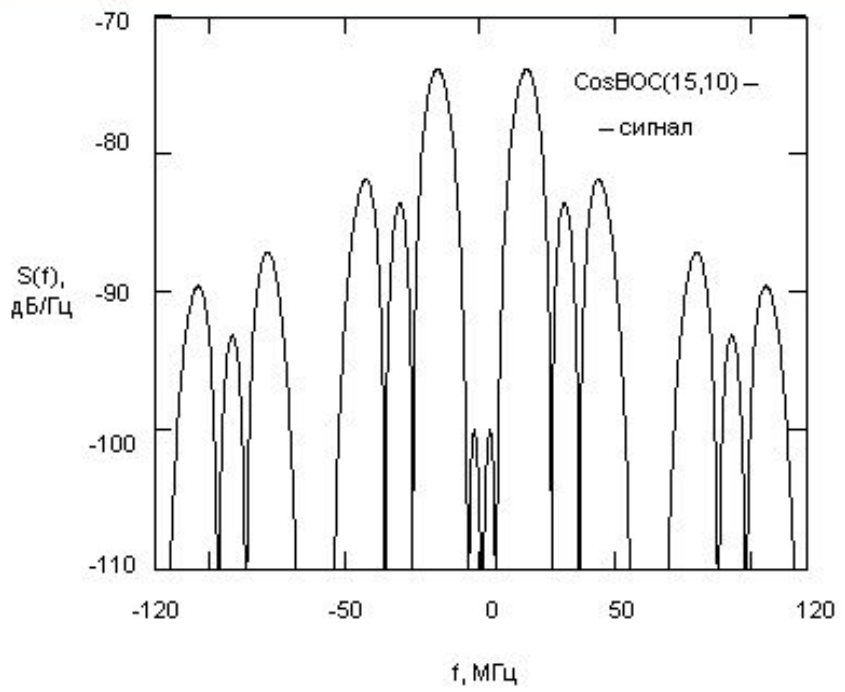


Рис.5б

Для сравнения на рисунках пунктиром показаны графики энергетического спектра $S_{\sin}(f)$ одиночного символа соответствующей синусной МПСП.

Графики энергетического спектра $S_{\cos}(f)$ одиночного символа косинусной МПСП при $N_M = 4$

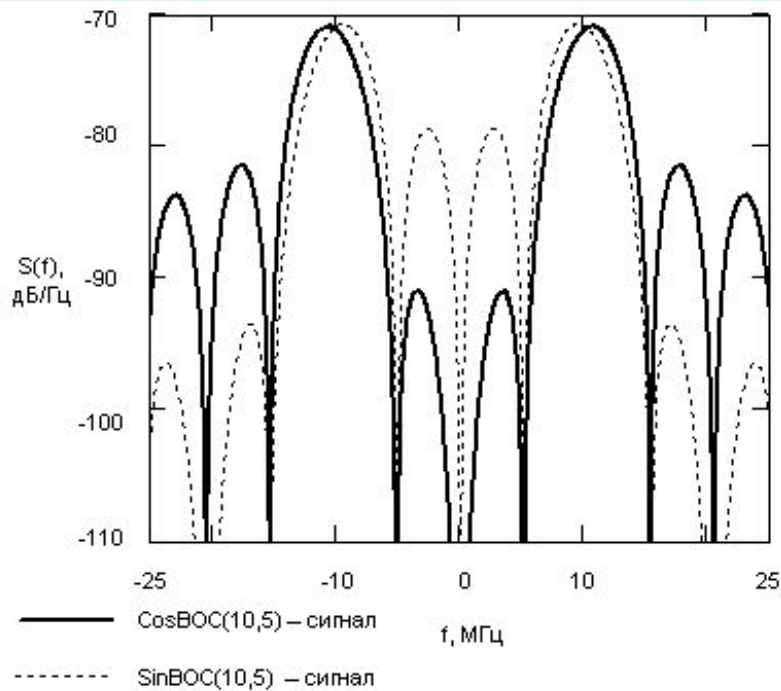


Рис.6а

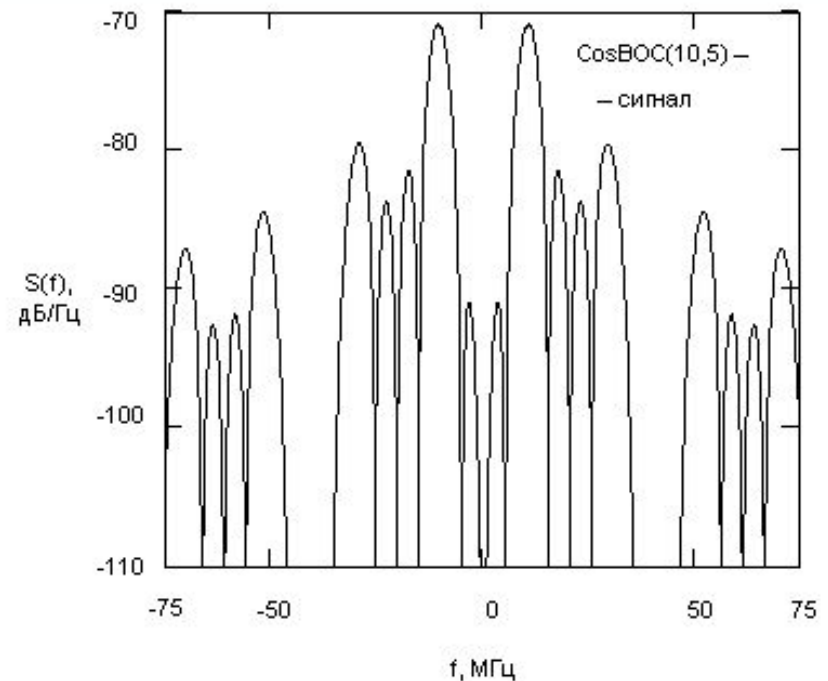


Рис.6б

Для сравнения на рисунках пунктиром показаны графики энергетического спектра $S_{\sin}(f)$ одиночного символа соответствующей синусной МПСП.

Графики энергетического спектра $S_{\cos}(f)$ одиночного символа косинусной МПСП при $N_M = 12$

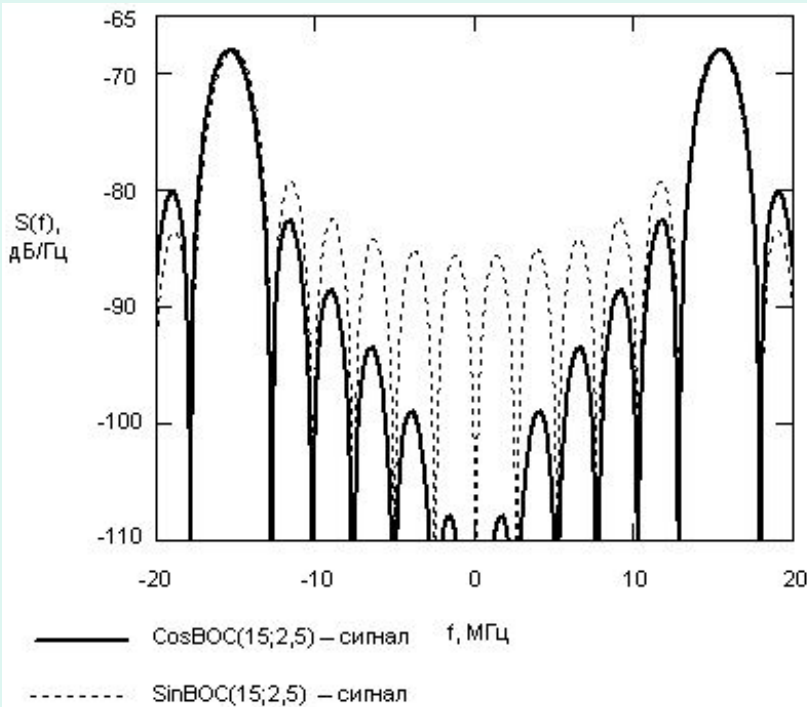


Рис.7а

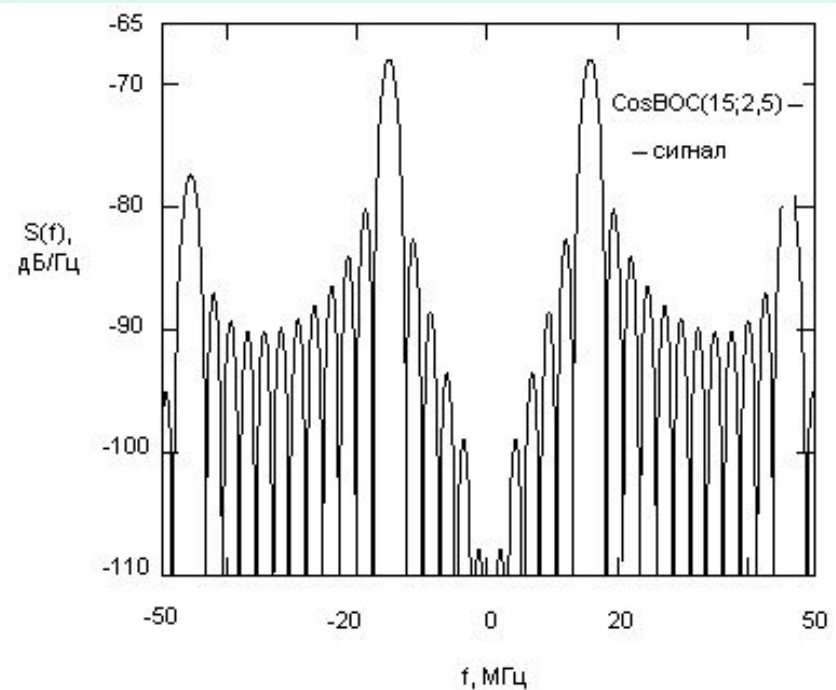


Рис.7б

Для сравнения на рисунках пунктиром показаны графики энергетического спектра $S_{\sin}(f)$ одиночного символа соответствующей синусной МПСП.

AltBOC-сигналы

В системе Galileo предполагается применение AltBOC–сигналов с модуляцией типа AltBOC(15,10) в диапазоне E5 на частоте $f_H=1191,795$ МГц.

Особенность AltBOC-сигналов заключается в использовании комплексного меандрового колебания:

$$r_k(t) = r_{\cos}(t) + jr_{\sin}(t) \quad (13)$$

Комплексная МПСП имеет вид:

$$d_k(t) = g(t) \cdot r_k(t) \quad (14)$$

Модулирующая функция для AltBOC–сигнала системы Galileo определяется в виде:

$$d_{AltBOC}(t) = d_{k1}(t) + d_{k2}^*(t), \quad (15)$$

где

$$d_{k1}(t) = g_1(t) \cdot r_k(t); \quad d_{k2}^*(t) = g_2(t) \cdot r_k^*(t); \quad r_k^*(t) = r_{\cos}(t) - jr_{\sin}(t);$$

Видно, что $d_{k1}(t)$ и $d_{k2}^*(t)$ – содержат разную информацию.

Преобразовав (15), имеем:

$$d_{AltBOC}(t) = d_{BOC1}(t) + jd_{BOC2}(t), \quad (16)$$

где $d_{BOC1}(t) = [g_1(t) + g_2(t)]r_{\cos}(t)$ – косинусная МПСП; (17)

$d_{BOC2}(t) = [g_1(t) - g_2(t)]r_{\sin}(t)$ – синусная МПСП. (18)

МПСП $d_{BOC1}(t)$ и $d_{BOC2}(t)$ характеризуют косинусный и синусный ВОС–сигналы (CosBOC(15,10) и SinBOC(15,10)), причем каждый из сигналов содержит свою информацию.

Составная комплексная МПСП $d_{AltBOC}(t)$ в случае AltBOC-сигнала представляет собой два обычных ВОС-сигнала (косинусный и синусный), находящихся в квадратуре и содержащих разную информацию.

В системе Galileo один AltBOC–сигнал предназначен заменить два ШПС на частотах $f_{n1}=1176,45$ МГц (E5A) и $f_{n2}=1207,14$ МГц (E5B).

Заключение

1. Косинусные МШПС (CosBOC-сигналы) представляют собой сигналы с “расщепленным спектром” (т.е. $S_{\cos}(0)=0$) при любом N_M . Тогда как синусные МШПС (SinBOC-сигналы) имеют “расщепленный спектр” только при N_M – четном.
2. Для косинусных МШПС характерно распределение энергии по частотам в большой степени вне основных лепестков спектра, тогда как для синусных МШПС энергия в большой степени распределяется между основными лепестками спектра.
3. Применение косинусных МШПС (наряду с синусными МШПС) заметно расширяет возможности меандровых радиосигналов в СРНС нового поколения.