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 (BOC-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).

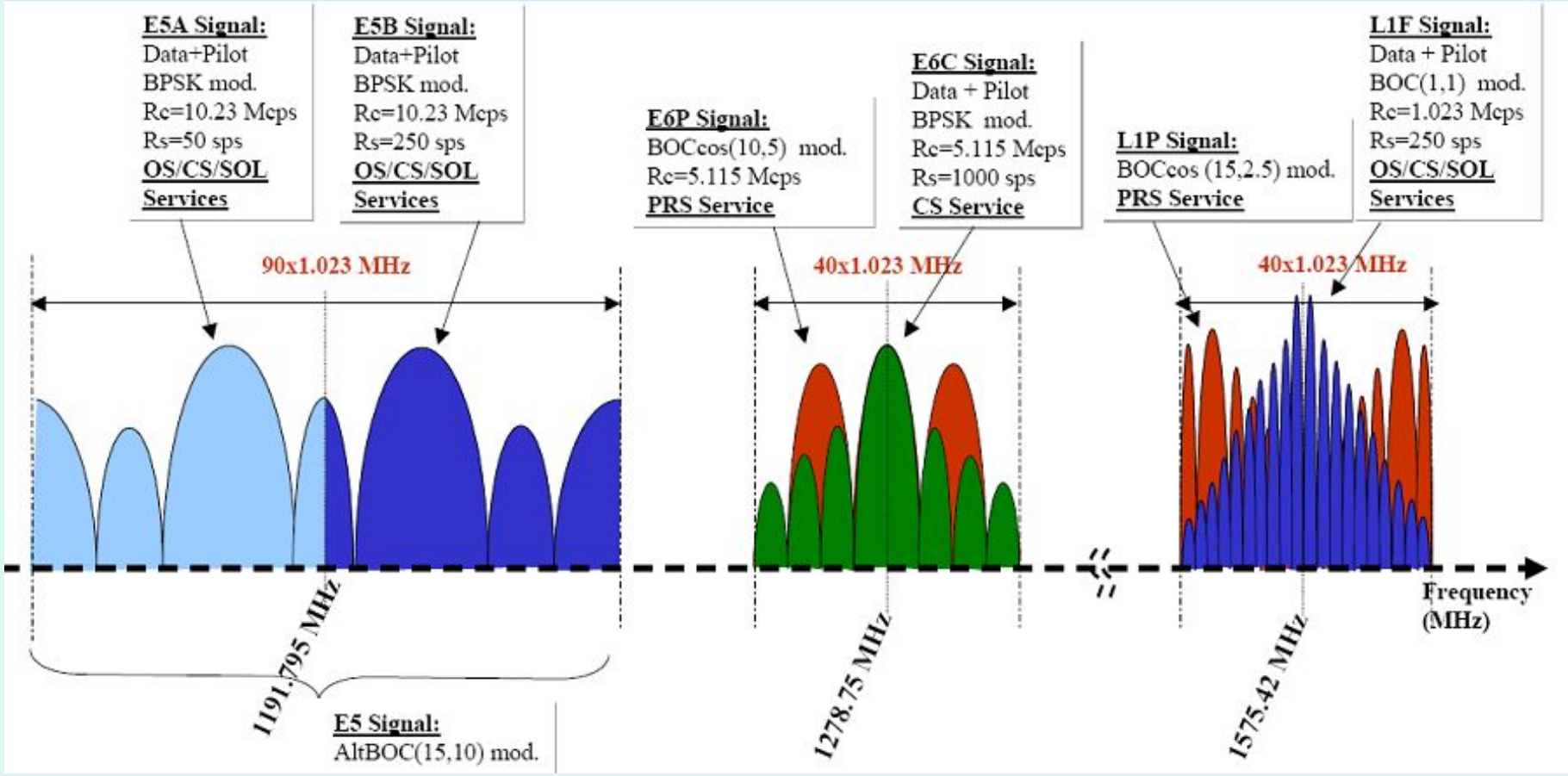
Применяемые в настоящее время МШПС – в большинстве Sin МШПС (SinBOC-сигналы)

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



Примеры косинусных МШПС (СРНС Galileo)

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

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

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

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

Математические модели косинусных меандровых ШПС (CosBOC–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);

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

– собственно ПСП дальномерного кода;

$$r_{\sin}(t)=\operatorname{sign}[\sin\omega_м t] \quad (4)$$

– поднесущее синусное меандровое колебание;

$$r_{\cos}(t)=\operatorname{sign}[\cos\omega_м t] \quad (5)$$

– поднесущее косинусное меандровое колебание;

$\omega_м=2\pi f_м; f_м=\dfrac{1}{T_м}; T_м=2\tau_м; f_м=\dfrac{1}{2\tau_м}$ – частота поднесущего меандрового колебания;

$\tau_м$ – длительность меандрового импульса;

τ_c – длительность символа (элемента, чипа)ПСП;

$k=0,1,2,...,(L-1); \nu_к=\pm1; T_L=L\tau_c; f_c=\dfrac{1}{\tau_c}$ – частота следования символов;

L – количество символов на периоде ПСП.

Типы косинусной меандровой модуляции

CosBOC $(f_м, f_c)$ или CosBOC(α, β),

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

Примеры косинусных МШПС (система Galileo)

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

Обобщенный параметр МШПС:

$$N_м = \frac{\tau_c}{\tau_м} = \frac{2 f_м}{f_c} = \frac{2\alpha}{\beta} \qquad (6)$$

- коэффициент кратности меандровых импульсов в символе МПСП.

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

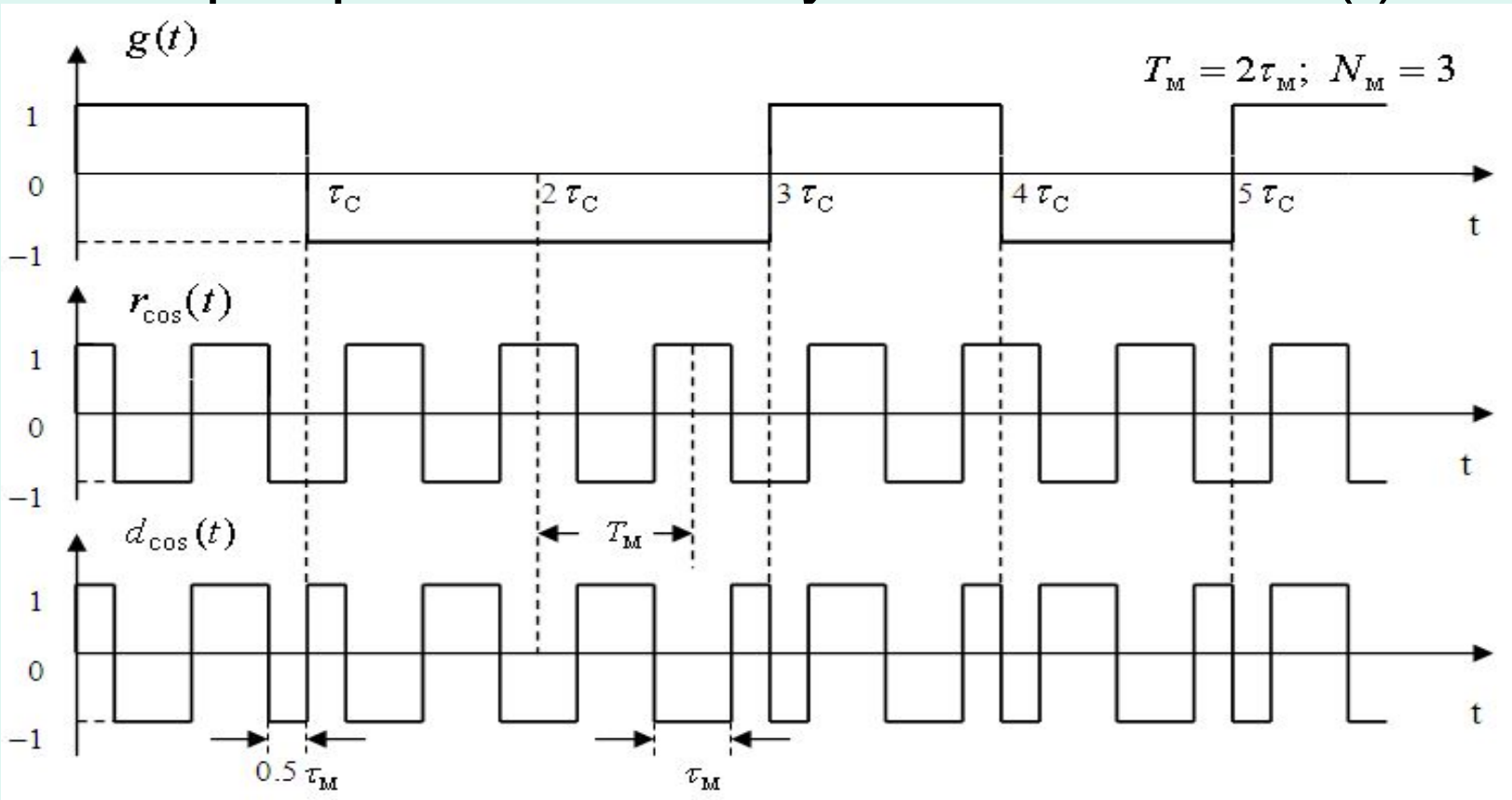


Рисунок 1

Косинусный МС:

$$\mu_{\cos C N_м(t)} = rect_{0,5\tau_м}[t] + \sum_{m=1}^{N_м-1} (-1)^m rect_{\tau_м}[t-(m-0,5)\tau_м] + \\ + (-1)^{N_м} rect_{0,5\tau_м}[t-(N_м-0,5)\tau_м]. \quad (7)$$

Графики типовых косинусных МС

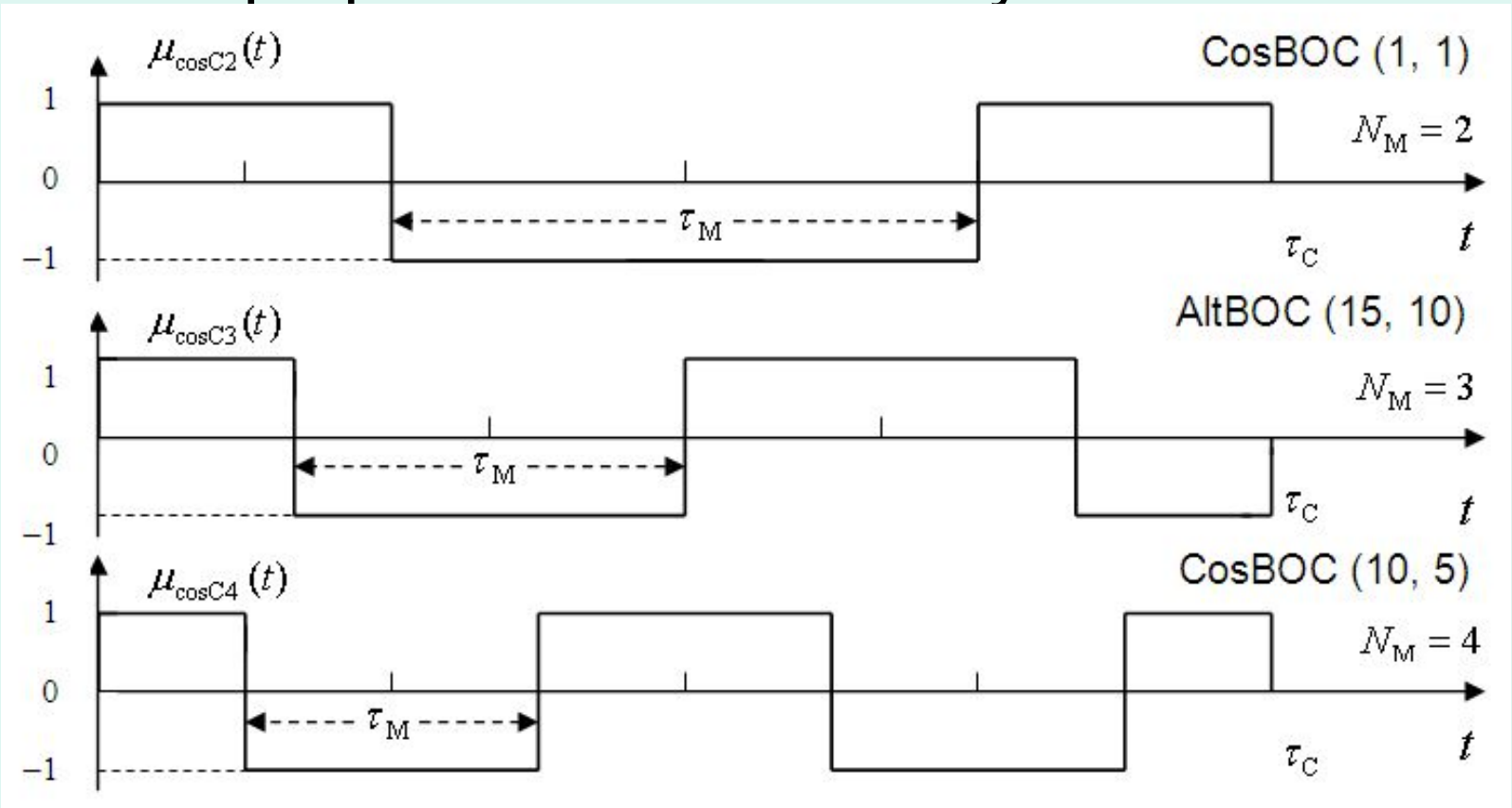


Рисунок 2

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

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

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

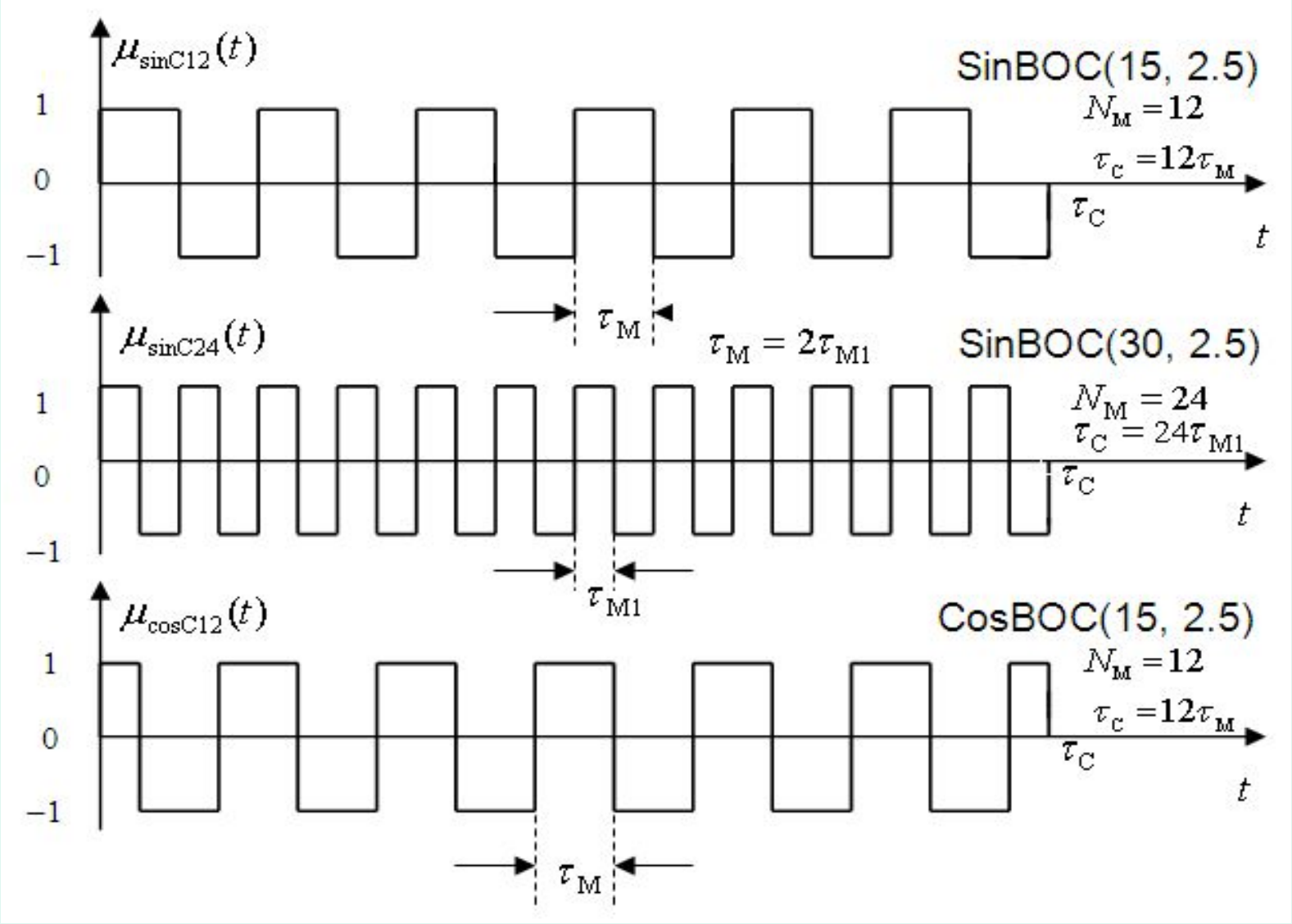


Рисунок 3

Энергетические спектры одиночных косинусных МПСП дальномерного кода

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

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

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

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

T_L – длительность периода МПСП;

L – число косинусных МС на периоде МПСП.

Энергетические спектры одиночных символов косинусных МПСП дальномерного кода

$$S_{\cos}(\omega) = \frac{1}{\tau_{\text{с}}} \left| F_{\cos}(\omega) \right|^2, \qquad (10)$$

где

$$F_{\cos}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \mu_{\cos C N_{м}}(t) \mathrm{e}^{-j\omega t} dt \qquad (11)$$

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

Согласно (8), (10) и (11) для различных значений $N_{м}$ имеем:

$$S_{\cos}(f) = \begin{cases} \dfrac{1}{f_{\text{с}}} \left[\dfrac{2\sin\left(\dfrac{\pi f}{f_{\text{с}}}\right) \cdot \sin^2\left(\dfrac{\pi f}{2N_{\text{м}} f_{\text{с}}}\right)}{\left(\dfrac{\pi f}{f_{\text{с}}}\right) \cdot \cos\left(\dfrac{\pi f}{N_{\text{м}} f_{\text{с}}}\right)} \right]^2 & \text{при } N_{\text{м}} \text{ – чётном } (N_{\text{м}} = 2, 4, 6, \ldots); \\ \dfrac{1}{f_{\text{с}}} \left[\dfrac{2\cos\left(\dfrac{\pi f}{f_{\text{с}}}\right) \cdot \sin^2\left(\dfrac{\pi f}{2N_{\text{м}} f_{\text{с}}}\right)}{\left(\dfrac{\pi f}{f_{\text{с}}}\right) \cdot \cos\left(\dfrac{\pi f}{N_{\text{м}} f_{\text{с}}}\right)} \right]^2 & \text{при } N_{\text{м}} \text{ – нечётном } (N_{\text{м}} = 3, 5, 7, \ldots). \end{cases} \qquad (12)$$

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

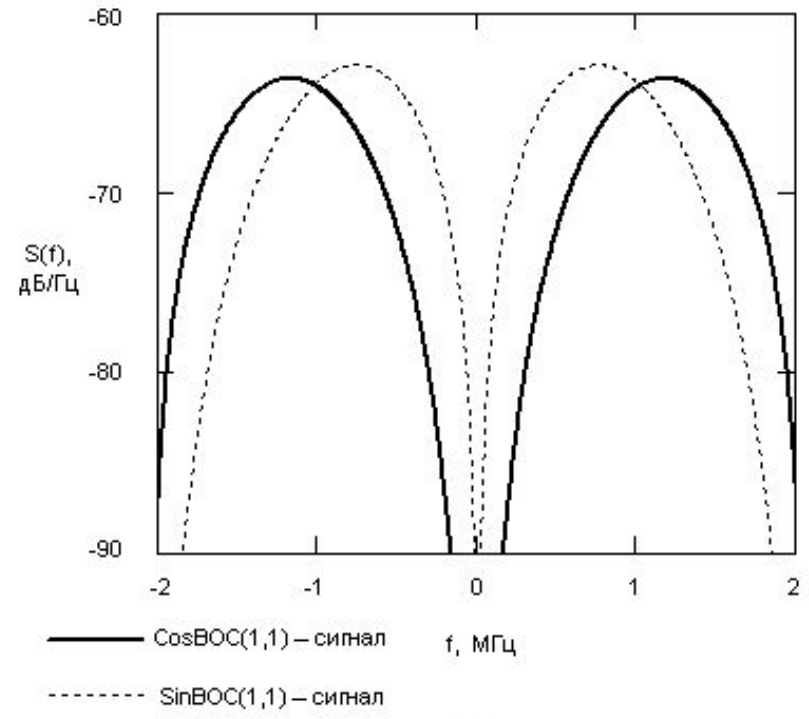


Рис.4а

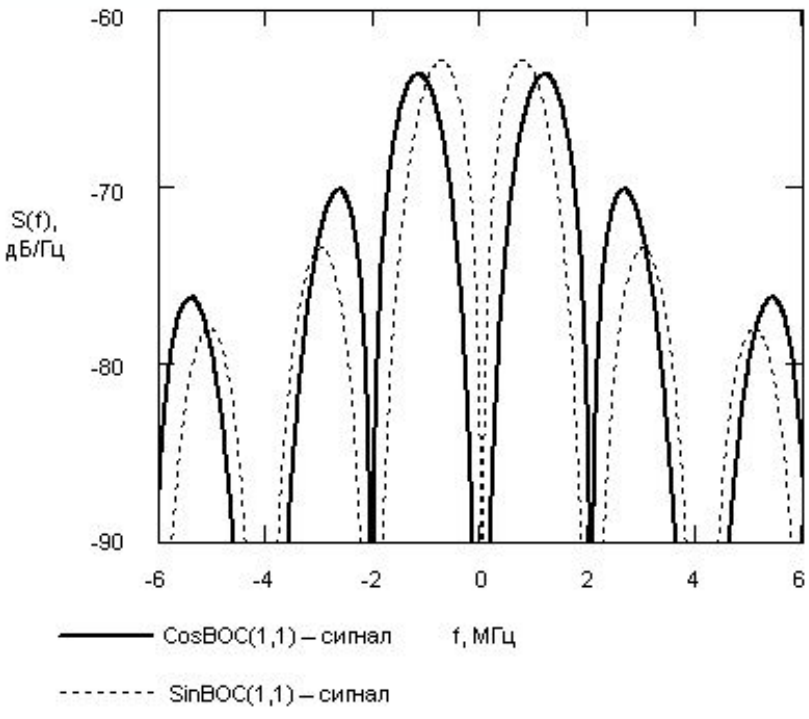
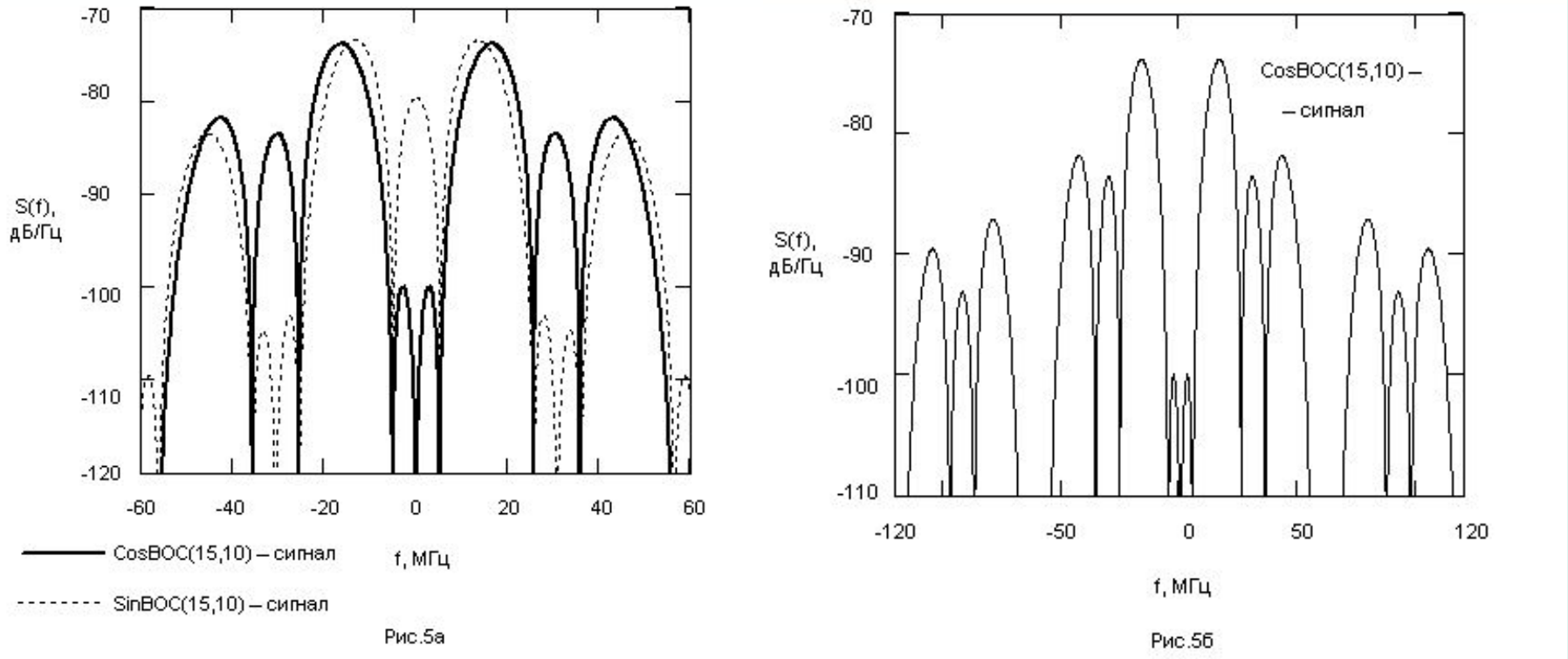


Рис.4б

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 $N_{\text{м}} = 3$



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 $N_{\text{м}} = 4$

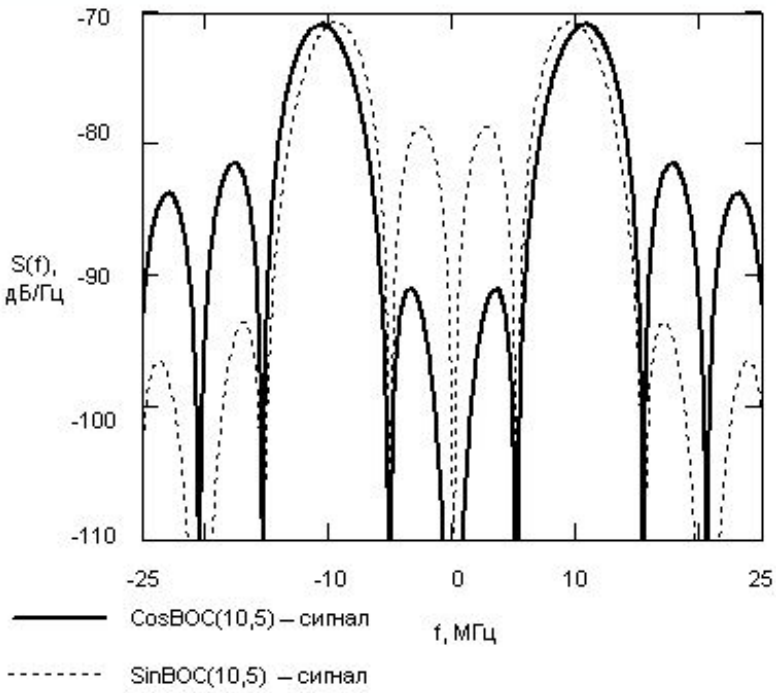


Рис.6а

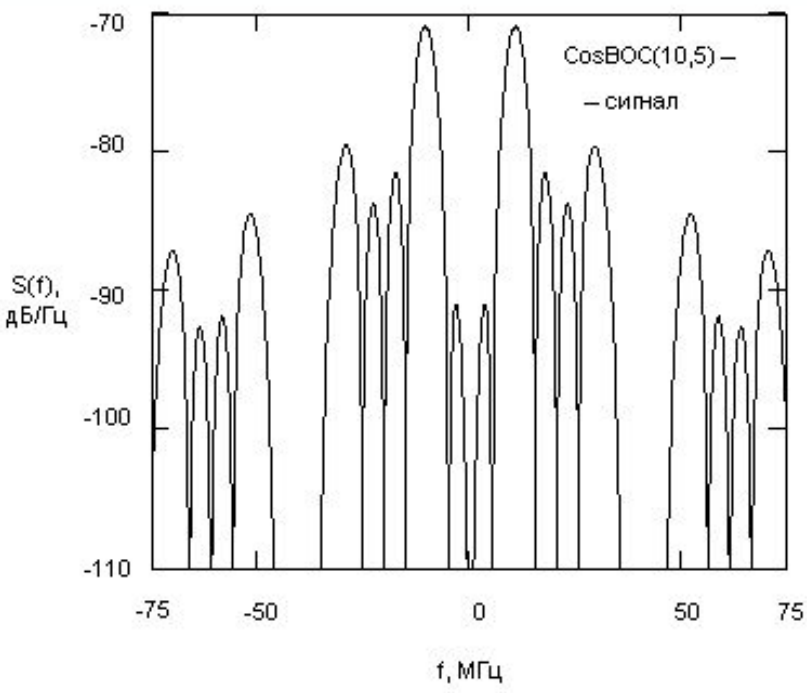


Рис.6б

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 $N_{\text{м}} = 12$

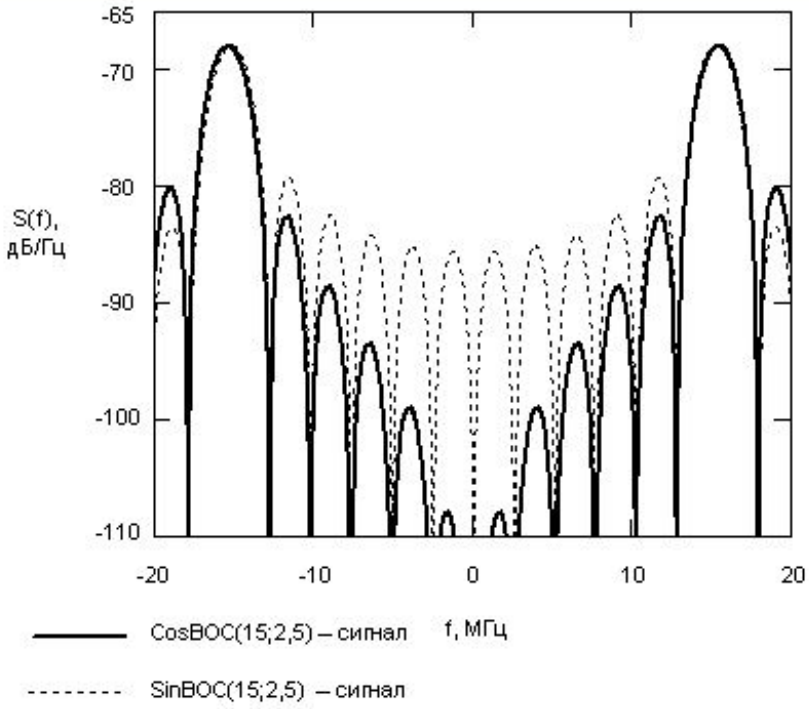


Рис.7а

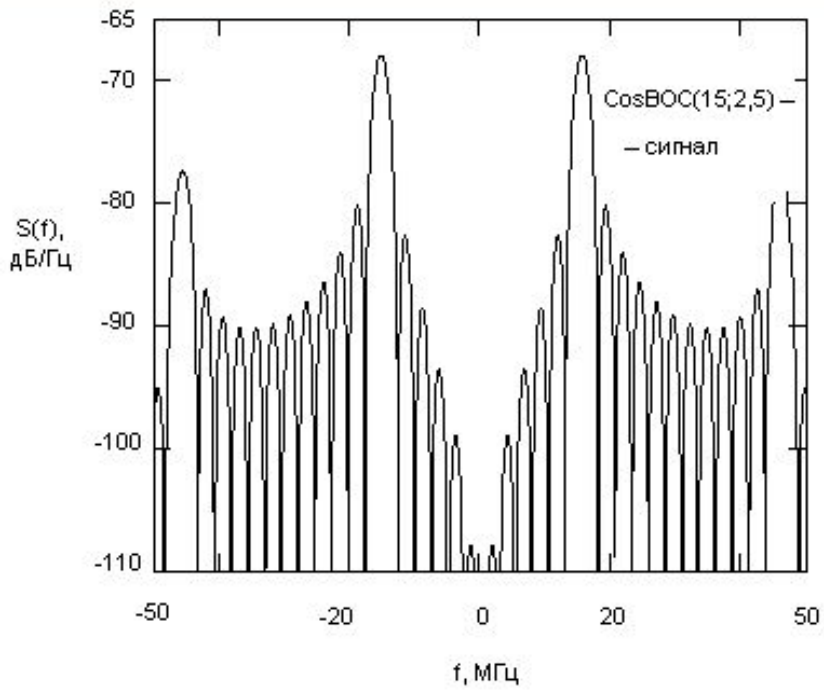


Рис.7б

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 $f_н$=1191,795 МГц.

Особенность AltBOC-сигналов заключается в использовании комплексного меандрового колебания:

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

Комплексная МПСП имеет вид:

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

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

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

где

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

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

Преобразовав (15), имеем:

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

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 BOC–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 BOC-сигнала (косинусный и синусный), находящихся в квадратуре и содержащих разную информацию.

В системе Galileo один AltBOC–сигнал предназначен заменить два ШПС на частотах $f_{н1}$=1176,45 МГц (E5A) и $f_{н2}$=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.