

Помехоустойчивость перспективных сигналов спутниковых радионавигационных систем

Евгений Калугин (Калужская обл.)

В статье приведены основные параметры существующих и перспективных сигналов спутниковых радионавигационных систем GPS и Галилео. Для каждого сигнала определён уровень сигнала помехи, при котором отношение сигнал/шум достигает предела Шеннона. Вычислено минимальное и максимальное время корреляции сигналов.

В настоящее время наблюдается резкое увеличение количества пользователей различных устройств, ранее практически не доступных, например, GPS-приёмники, GSM-модемы, модемы для построения беспроводных сетей, спутниковые телефоны. Появилась коммерческая услуга по предоставлению дифференциальных поправок для GPS-приёмников – технология Starfire. Используя эту технологию, можно с помощью GPS-приёмника вычислить собственные координаты с точностью до десятков сантиметров. При объединении компьютеров в сеть по технологии ZigBee также можно вычислить координаты каждого компьютера в сети с точностью до нескольких метров. Услуги по определению координат GSM-устройств (телефонов, модемов) предоставляются операторами сотовых сетей. Информация системы GPS сегодня используется службами защиты, спасения и безопасности, при контроле за передвижением грузов, в автомобильной, морской, персональной навигации, геодезии,

сельском хозяйстве, при синхронизации различных систем. При этом часто бывает необходимо непрерывно получать навигационные данные.

Однако, известно, что современный сигнал C/A-кода системы GPS не удовлетворяет требованиям надёжности, помехозащищённости, точности определения координат [1]. В связи с этим США модернизируют систему GPS. Планируется ввести четыре новых сигнала, доступных гражданским пользователям: L5I, L5Q, L2CL, L2CM. Одновременно для получения высокоточных навигационных данных страны ЕЭС создают собственную систему Галилео. После её запуска станут доступными ещё 10 сигналов. Такое многообразие требует от приёмников выбора сигналов, по которым будут выполняться навигационные вычисления. Особенно это важно в сложной помеховой обстановке, в условиях работы приёмников вблизи аэропортов или других объектов, имеющих большое количество радиосвязных и радиолокационных средств. В этих условиях

большую роль будет играть уровень защиты от помех сигналов спутниковых радионавигационных систем (СРНС).

Вычислим значение уровня защиты для существующих и перспективных сигналов СРНС.

Для этого нам будут необходимы параметры, приведённые в таблицах 1, 2 [2]. Параметры сигналов системы Галилео окончательно не утверждены и могут быть изменены.

Во всех действующих и перспективных радионавигационных системах используются шумоподобные сигналы, поэтому уровень защиты от помех q^2 в таком канале связи можно вычислить по формуле [3, 4]:

$$q^2 = 2\rho^2 B, \quad (1)$$

где $\rho^2 = P_5/P_n$ – отношение мощностей сигнала P_5 и шума P_n на входе приёмника, $B = FT = T\tau_0 = N$ – база сигнала, равная числу импульсов в одном периоде сигнала. Величину P_n найдём из соотношения: $P_n = kT\Delta F$, где $k = 1,38 \times 10^{-23}$ – постоянная Больцмана, T – температура окружающей среды в градусах Кельвина, ΔF – полоса частот, занятая сигналом (будем считать, что она равна ширине спектра сигнала, ограниченной первыми нулями). Вычисляя выражение (1) для сигнала системы GPS с C/A-кодом при температуре окружающей

Таблица 1. Характеристики сигналов GPS

| Тип сигнала | Параметры сигналов | | | | | |
|-------------|------------------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------------------|----------------|
| | несущая частота сигнала, ГГц | тактовая частота, МГц | используемая длина кода | полная длина кода | мощность у поверхности Земли, дБ/Вт | период сигнала |
| C/A-код | 1575,42 | 1,023 | 1023 | 1023 | -158 | 1 мс |
| P-код (L1) | 1575,42 | 10,23 | $6,2 \times 10^{12}$ | $2,4 \times 10^{14}$ | -161 | 7 суток |
| P-код (L2) | 1575,42 | 10,23 | $6,2 \times 10^{12}$ | $2,4 \times 10^{14}$ | -165 | 7 суток |
| L2CL-код | 1227,6 | 1,023 | 767250 | 134217727 | -165 | 1,5 с |
| L2CM-код | 1227,6 | 1,023 | 10230 | 134217727 | -165 | 10 мс |
| L5I-код | 1176,45 | 10,23 | 10230 | 67084290 | -158 | 1 мс |
| L5Q-код | 1176,45 | 10,23 | 10230 | 67084290 | -158 | 1 мс |
| M-код | 1575,42 | Неизвестно | Неизвестно | Неизвестно | Неизвестно | Неизвестно |

среды 300°K без учета внутрисистемных помех, получим:

$$q_{C/A}^2 = \frac{2 \times 1,6 \times 10^{-16} \times 1023}{1,38 \times 10^{-23} \times 300 \times 2,46 \times 10^6} = 32,73 \text{ раз} \approx 15 \text{ дБ.} \quad (2)$$

То есть приём сигналов с C/A-кодом системы GPS при температуре 300°K возможен только в том случае, если уровень помех в полосе сигнала превышает уровень теплового шума на величину не более 15 дБ. Однако эта величина ещё не до конца характеризует свойства сигнала. Необходимо знать конкретное значение мощности сигналов помех $P_{n,0}$, при воздействии которых работа приёмных устройств невозможна. Для его определения используем теорему Шеннона, согласно которой величина $q_0^2 = 2 \ln 2 = -1,6$ дБ является пороговой при определении пропускной способности канала. Если отношение сигнал/шум в канале больше порогового значения, $q_0^2 < q^2$, то в нём возможна передача сигнала со сколь угодно малой вероятностью ошибки. В противном случае, $q_0^2 > q^2$, вероятность ошибки резко возрастает и передача сигнала невозможна. Вычислим теперь искомую мощность сигналов помех $P_{n,0}$, сложив значение уровня теплового

шума в полосе сигнала в децибелах, вычисленное по формуле:

$$P_n = 1,38 \times 10^{-23} \times 300 \times 2,46 \times 10^6 = 1,018 \times 10^{-14} \text{ Вт} \approx -140 \text{ дБ/Вт,}$$

значение помехозащищённости кода $q_{C/A}^2$ и значение предела Шеннона:

$$P_{n,0} = -140 + 15 + (-1,6) = -126,6 \text{ дБ/Вт.}$$

Эту величину можно получить и другим способом – используя формулу, следующую из теоремы Шеннона:

$$q_0^2 = \frac{2\rho^2 F}{\tau_0} \quad (3)$$

где F – полоса частот, занимаемая сигналом, τ_0 – длительность элемента последовательности. Учитывая (1), получаем:

$$P_{n,0} = \frac{P_s B}{\ln 2} \quad (4)$$

Вычислим выражение (4) для сигнала системы GPS с C/A-кодом:

$$P_{n,0} = \frac{1,6 \times 10^{-16} \times 1023}{\ln 2} = 2,3 \times 10^{-13} \text{ Вт} \approx -127 \text{ дБ/Вт.} \quad (5)$$

Аналогично, используя выражения (1) и (4), вычислим уровень за-

щиты от помех всех сигналов спутниковых радионавигационных систем с известными характеристиками. Результаты вычислений представлены в таблицах 3 и 4. В системе GPS для формирования P(Y)-, L2-, L5-сигналов используются сегменты псевдослучайных последовательностей. Для этих сигналов в таблице 3 в верхней строке приведены данные об отношении сигнал/шум и пределе Шеннона для такого сегмента, а в нижней строке приведены аналогичные данные для полной длины последовательности.

Значения, приведённые в таблицах 3 и 4, подсчитаны для одного полного периода каждого из сигналов. Однако это означает, что навигационные данные будут обновляться в приёмниках не чаще одного раза за период сигнала. Например, в случае P(Y)-кода системы GPS это означает, что данные будут обновляться один раз в неделю. Поэтому вычисленные значения говорят, скорее, о потенциальном уровне защиты от помех, а не о его реальном значении. Для определения реальных значений воспользуемся данными из [5], согласно которым обычно время накопления сигнала составляет 1...4 мс, а максимальное

Таблица 2. Характеристики сигналов системы Галилео

| Тип сигнала | Параметры сигналов | | | | |
|-------------|------------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------------------------|--------------------|
| | несущая частота сигнала, ГГц | тактовая частота, МГц | полная длина кода | мощность у поверхности Земли, дБ/Вт | период сигнала, мс |
| E5a1 | 1176,45 | 10,23 | 204600 | -155 | 20 |
| E5b1 | 1207,14 | 10,23 | 40920 | -152 | 4 |
| E5I | 1176,45 | 10,23 | 1023000 | -152 | 100 |
| E5Q | 1207,14 | 10,23 | 1023000 | -152 | 100 |
| E6a | 1278,75 | 5,115 | Неизвестно | -155 | Неизвестно |
| E6b | 1278,75 | 5,115 | 5115 | -155 | 1 |
| E6c | 1278,75 | 5,115 | 511500 | -155 | 100 |
| L1a | 1575,42 | $m \times 1,023$ | Неизвестно | -155 | Неизвестно |
| L1b | 1575,42 | 2,046 | 8184 | -155 | 4 |
| L1c | 1575,42 | 2,046 | 204600 | -155 | 100 |

Таблица 3. Уровень защиты от помех сигналов системы GPS и значение уровня мощности помех, соответствующее достижению предела Шеннона

| Сигнал (сегмент/полный сигнал) | Параметры сигналов | | | уровень мощности шума (сегмент/полный сигнал), дБ/Вт |
|--------------------------------|-----------------------|--|--|--|
| | тактовая частота, МГц | база сигнала (сегмент/полный сигнал) | помехоустойчивость (сегмент/полный сигнал), дБ | |
| L1/C/A-код | 1,023 | 1023 | 15 | -127 |
| L1/P(Y)-код | 10,23 | $6,2 \times 10^5 / 2,4 \times 10^{14}$ | 100/115 | -30/-15 |
| L2/P(Y)-код | 10,23 | $6,2 \times 10^5 / 2,4 \times 10^{14}$ | 95/110 | -35/-20 |
| L2/CM-код | 1,023 | 10230/134217727 | 17/59 | -124/-82 |
| L2/CL-код | 1,023 | 767250/134217727 | 36/59 | -105/-82 |
| L5/I-код | 10,23 | 10230/67084290 | 15/53 | -115/-77 |
| L5/Q-код | 10,23 | 10230/67084290 | 15/53 | -117/-78 |

Таблица 4. Уровень защиты от помех сигналов системы Галилео и значение уровня мощности помех, соответствующее достижению предела Шеннона

| Сигнал | Параметры сигналов | | | |
|--------|-----------------------|--------------|------------------------|------------------------------|
| | тактовая частота, МГц | база сигнала | помехоустойчивость, дБ | уровень мощности шума, дБ/Вт |
| E5a1 | 10,23 | 204600 | 30 | -100 |
| E5b1 | 10,23 | 40920 | 25 | -105 |
| E5Q | 10,23 | 1023000 | 40 | -90 |
| E6a | 5,115 | Неизвестно | | |
| E6b | 5,115 | 5115 | 17 | -116 |
| E6c | 5,115 | 511500 | 37 | -96 |
| L1a | $m \times 1,023$ | Неизвестно | | |
| L1b | 2,046 | 8184 | 21 | -114 |
| L1c | 2,046 | 203100 | 35 | -100 |

Таблица 5. Уровень защиты от помех сигналов системы GPS и значение уровня мощности помех, соответствующее достижению предела Шеннона, при различном времени корреляции

| Сигнал | Время накопления, мс | База сигнала, N | Помехоустойчивость, дБ | Уровень мощности шума, дБ/Вт |
|----------|----------------------|-----------------|------------------------|------------------------------|
| L1 | 4 | 4092 | 21 | -119 |
| C/A-код | 20 | 20460 | 28 | -112 |
| L1 | 4 | 40920 | 18 | -112 |
| P(Y)-код | 20 | 204600 | 25 | -105 |
| L2 | 4 | 40920 | 14 | -116 |
| P(Y)-код | 20 | 204600 | 21 | -109 |
| L2C-код | 4 | 4092 | 14 | -126 |
| | 20 | 20460 | 21 | -119 |
| L5-код | 4 | 40920 | 21 | -109 |
| | 20 | 204600 | 28 | -102 |

Таблица 6. Уровень защиты от помех сигналов системы Галилео и значение уровня мощности помех, соответствующее достижению предела Шеннона, при различном времени корреляции

| Сигнал | Время накопления, мс | База сигнала, N | Помехоустойчивость, дБ | Уровень мощности шума, дБ/Вт |
|-----------|----------------------|-----------------|------------------------|------------------------------|
| E5a1 | 4 | 40920 | 24 | -106 |
| | 20 | 204600 | 31 | -99 |
| E5b1, E5Q | 4 | 40920 | 27 | -103 |
| | 20 | 204600 | 34 | -96 |
| E6a | 4 | 40920 | 24 | -110 |
| | 20 | 204600 | 31 | -103 |
| E6b,c | 4 | 20460 | 24 | -110 |
| | 20 | 102300 | 31 | -103 |
| L1a | 4 | Неизвестно | | |
| | 20 | Неизвестно | | |
| L1b,c | 4 | 8184 | 22 | -116 |
| | 20 | 40920 | 29 | -109 |

Таблица 7. Минимальное время корреляции сигналов системы GPS

| Сигнал | Время корреляции, мкс/количество элементов, N | | |
|------------|---|-------------------|---------------------|
| | $\sigma^2 = 1,6$ дБ | $\sigma^2 = 4$ дБ | $\sigma^2 = 9,6$ дБ |
| C/A-код | 22/22 | 78/79 | 312/319 |
| P-код (L1) | 44/450 | 156/1596 | 625/6393 |
| P-код (L2) | 115/1176 | 417/4705 | 1660/23 529 |
| L2C-код | 115/117 | 416/425 | 1660/1698 |
| L5-код | 22/225 | 78/797 | 312/3191 |

Таблица 8. Минимальное время корреляции сигналов системы Галилео

| Сигнал | Время корреляции, мкс/количество элементов, N | | |
|--------|---|-------------------|---------------------|
| | $\sigma^2 = 1,6$ дБ | $\sigma^2 = 4$ дБ | $\sigma^2 = 9,6$ дБ |
| E5 | 22/225 | 78/797 | 312/3191 |
| E6 | 22/102 | 78/399 | 312/1995 |
| L1b,c | 33/68 | 112/270 | 469/1350 |

время накопления сигнала соответствует длительности бита передачи навигационных данных и составляет 20 мс. Результаты вычислений уровня защиты от помех при времени корреляции 4 и 20 мс представлены в таблицах 5 и 6.

В случае использования сигналов, немодулированных данными (сигналы: P(Y)-кода на частоте L2, L5Q, L2CL в системе GPS, сигналы E5Q, L1c в системе Галилео), время корреляции может быть увеличено. Максимально возможное время корреляции можно определить из выражения [3]:

$$T = \tau N, \tag{6}$$

где N – количество элементов сигнала, участвующих в процессе корреляции, – вычисляется из формулы:

$$N_{\max} < \frac{0,26}{\delta f}. \tag{7}$$

Здесь δf – суммарная нестабильность генераторов АП и НИСЗ. Нестабильность генератора НИСЗ определяется стабильностью цезиевого генератора и равна $(1...5) \times 10^{-13}$. Стабильность современных термостабилизированных кварцевых генераторов для переносных устройств может достигать значений 5×10^{-11} . Таким образом, основную нестабильность вносит генератор АП. Подставляя в формулу (7) указанное значение нестабильности генератора, получим максимальное количество элементов сигнала N_{\max} , которые могут участвовать в процессе корреляции: $N_{\max} = 5,2 \times 10^9$. Соответственно, максимальное время корреляции кодов с тактовой частотой 1,023 МГц составляет 5083 с и уменьшается с ростом тактовой частоты.

Определим также для каждого сигнала минимальное время корреляции. Его величина определяется за-

данным порогом ложной тревоги. Например, при вероятности ложной тревоги 10^{-2} и 10^{-5} необходимо иметь отношение сигнал/шум 4 дБ и 9,6 дБ соответственно [6].

Из формулы (1) следует:

$$B = \frac{q^2 P_n}{2P_s}; \quad (8)$$

учитывая, что $B = T/\tau_0$, находим:

$$T = \frac{q^2 P_n \tau_0}{2P_s}. \quad (9)$$

Результаты вычислений этого выражения для различных сигналов СРНС (также без учета внутрисистемных помех) и соответствующие значения количества элементов последовательности для значений $q^2 = -1,6$ дБ (предел Шеннона), 4 дБ (вероятность ложной тревоги 10^{-2}), 9,6 дБ (вероятность ложной тревоги 10^{-5}) приведены в таблицах 7 и 8.

Сравнивая данные таблиц 5 и 6, можно заметить, что сигналы системы Галилео потенциально обладают лучшей помехоустойчивостью по сравнению с существующими и перспективными сигналами систе-

мы GPS. Поэтому в сложной помеховой обстановке для определения собственных координат пользователям целесообразно использовать в диапазоне L1 сигналы L1b,c системы Галилео, а в диапазонах L5, L2 сигналы E5 этой же системы. Из сравнения данных таблиц 7 и 8 следует, что в случае отсутствия помех минимальное время поиска сигналов достигается при использовании сигналов E5, E6 в системе Галилео и сигналов, модулированных L5-, C/A-кодами, в системе GPS.

В заключение отметим, что данные таблиц 5 – 8 могут быть использованы при реализации алгоритмов повышения уровня защиты от помех в приёмниках сигналов СРНС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Volpe J.A. Vulnerability assessment of the transportation infrastructure relying on the Global Positioning System. Final Report. 2001.
2. ICD200cw1234. Interface Control Document. Navstar GPS Space Segment/Navigation, User Interfaces; ICDGPS705. Interface Control Document. Navstar GPS Spa-

ce Segment/User Segment L5 Interfaces; ICD-GPS-200c. Interface Control Document. Navstar GPS Space Segment/Proposed Interface. Revision Notice. L2 Civil (L2C) signal; J.-L. Issler; G.W. Hein, J. Godet, J.-C. Martin, Ph. Erhard, R. Lucas-Rodriguez, T. Pratt. Galileo Frequency & Signal Design. Galileo's World. 2003. Vol. 6. <http://www.galileoworld.com/galileoworld/article>; G.W. Hein, J. Godet, J.-L. Issler, J.-C. Martin, Ph. Erhard, R. Lucas-Rodriguez, T. Pratt. Status of Galileo Frequency and Signal Design, http://europa.eu.int/comm/dgs/energy_transport/galileo.

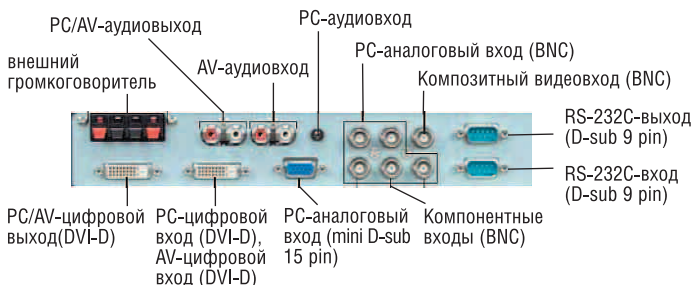
3. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985.
4. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Москва-Санкт-Петербург-Киев: Вильямс, 2003.
5. Grewal M.S., Weill L.R., Andrews A.P. Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration. New York-Chichester-Weinheim-Brisbane-Singapore-Toronto: Wiley&Sons, 2001.
6. Прокус Дж. Цифровая связь. Москва: Радио и связь, 2000.



КРУГЛОСУТОЧНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ 24\7

Full HD – профессиональных мониторов 46 - 65 дюймов

- Разрешение экрана Full HD 1920x1080 фирменная технология ASV Black TFT
- Разработано для коммерческой эксплуатации впервые безвентиляторное охлаждение, работа 24/7
- Простота обслуживания удаленная диагностика через порт RS-232C
- Полный комплект коммерческих приложений изменение размера изображения: видеостены, PIP, PbyP



ПРОСОФТ — официальный дистрибьютор компании SHARP в России и странах СНГ

PROSOFT®

Реклама

Тел.: (495) 232-2522 • E-mail: info@prochip.ru • www.prochip.ru