

ОБЗОР СПОСОБОВ РАСШИРЕНИЯ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ПЕРСПЕКТИВНОЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Сенченко Я.И.

Научный руководитель – канд. техн. наук Кузьмин Е.В.

Сибирский федеральный университет

В настоящее время к перспективным наземным радионавигационным системам (РНС) предъявляют высокие требования доступности на больших расстояниях (не менее 1000 км) [1]. Поэтому одной из наиболее важных задач является расширение рабочей зоны РНС. Перспективные РНС, как правило, включают в себя одну или несколько цепочек опорных станций (ОС) и неограниченное количество приемоиндикаторов [2]. Приём сигналов от каждой из ОС осуществляется на фоне внутрисистемных помех. К внутрисистемным помехам относятся сигналы «мешающих» (ближайших) ОС, по отношению к наиболее удаленным ОС. В перспективных морских радионавигационных системах находят применение шумоподобные сигналы с минимальной частотной манипуляцией (ШПС-МЧМ). Использование ШПС позволяет реализовать скрытную, помехозащищённую радиосистему с кодовым разделением каналов. Кроме того, применение ШПС позволяет совместить системы передачи информации и системы траекторных измерений [3].

Математическое описание шумоподобного сигнала с минимальной частотной манипуляцией можно представить в виде [4]:

$$s(t) = AD(t)[I(t)\cos(2\pi f_0 t) - Q(t)\sin(2\pi f_0 t)], \quad (1)$$

где A – амплитуда принимаемого сигнала; $D(t)$ – информационный сигнал, содержащий дифференциальные поправки к радионавигационным параметрам космических навигационных систем и служебную информацию (у каждой ОС сигнал $D(t)$ отличается), $D(t) = \pm 1$, $t \in [0; T_i]$; f_0 – центральная частота принимаемого сигнала; $I(t) = \cos \Theta(t)$ и $Q(t) = \sin \Theta(t)$ – косинусная и синусная квадратурные составляющие сигнала, $\Theta(t) = \frac{\pi}{2T} \int_0^t d(t') dt'$ – функция, определяющая закон угловой

модуляции, $d(t) = \sum_{i=0}^{N-1} d_i \text{rect}(t - iT)$, d_i – псевдослучайная последовательность (ПСП) длины N , $\text{rect}(t)$ – прямоугольный импульс единичной амплитуды и длительности T , T – длительность символа ПСП; φ_0 – начальная фаза принимаемого сигнала; T_i – период повторения сигнала.

Одной из наиболее важных задач в наземных РНС является приём широкополосного навигационного сигнала на фоне мощных структурных помех. Математическую модель аддитивной смеси шумоподобного сигнала, структурной помехи и белого гауссовского шума представим в виде:

$$y(t) = s(t - \tau_c) + \sum_{l=1}^L \gamma_l s_l(t - \tau_{cl}) + \xi(t), \quad (2)$$

где $s(t - \tau_c)$ и $s_l(t - \tau_{cl})$ – полезный сигнал и l -ая структурная помеха, L – число структурных помех, $\gamma_l = \sqrt{P_{cl}/P_c}$ – отношение «структурная помеха/сигнал», P_c и P_{cl} – мощность сигнала и l -ой структурной помехи соответственно, τ_c и τ_{cl} – задержка сигнала и l -ой структурной помехи соответственно, $\xi(t)$ – аддитивный белый гауссовский шум.

Для расчета разности амплитуд сигналов ОС в рабочей зоне радионавигационной системы воспользуемся приближенной формулой для расчета ослабления сигналов в свободном пространстве [5]:

$$L(r) = 32,5 + 20(\lg r + \lg f_i), \quad (3)$$

где $L(r)$ – потери при распространении сигнала в свободном пространстве (в дБ), r – расстояние от передающей антенны до приемной (в км), f_i – средняя частота спектра сигнала (в МГц). На рисунках 1 и 2 показана зависимость потерь при распространении сигнала в свободном пространстве от расстояния между передающей и приемной антеннами для трех значений средних частот спектра сигнала РНС. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют $f_i = i \cdot \bar{f}_i$, $i = \overline{1, 3}$.

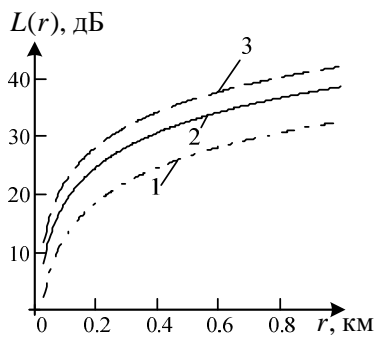


Рисунок 1

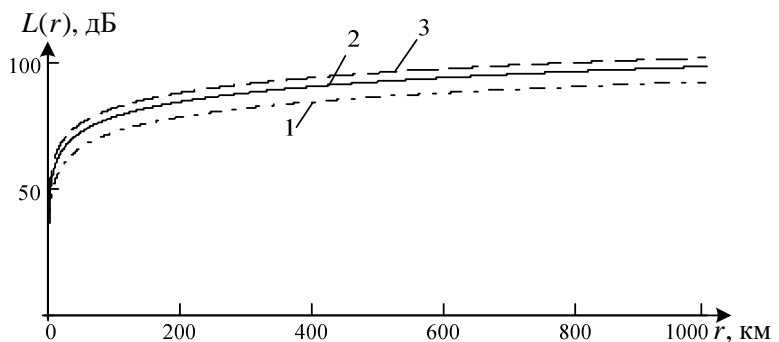


Рисунок 2

Как видно из рисунков 1 и 2, сигналы ОС, принимаемые в рабочей зоне, имеют существенную разницу амплитуд. А именно (для f_1): при удалении от опорной станции на 500 м затухание составляет $L(0,5) = 26,5$ дБ, при удалении на 600 км затухание составляет $L(600) = 88$ дБ, а при удалении на 1000 км $L(1000) = 92,5$ дБ. Таким образом, при нахождении приемоиндикатора РНС на расстоянии $r_1 = 600$ км от одной из ОС и на расстоянии $r_2 = 0,5$ км от другой из ОС, значение динамического диапазона составляет $D = (88 - 26,5)$ дБ = 61,5 дБ. При $r_1 = 0,5$ км, а $r_2 = 1000$ км значение динамического диапазона – $D = (92,5 - 26,5)$ дБ = 66 дБ. Следовательно, при построении современных радионавигационных систем параметры навигационных сигналов следует выбирать исходя из очень жестких требований по динамике сигналов ОС, так как значение динамического диапазона сигналов в современных радионавигационных системах не менее 70 дБ.

При приеме ШПС с дополнительно наложенным информационным сигналом существенно ухудшаются корреляционные свойства сигнала, и, соответственно, уменьшается рабочая зона РНС. Уровень боковых лепестков взаимокорреляционной функции ШПС-МЧМ без наложения дополнительной информации определяется по

формуле $d = 20 \lg(1/N) \approx 80$ дБ, а при наложении информации – $d = 20 \lg(1/\sqrt{N}) \approx 40$ дБ. Существует несколько способов расширения динамического диапазона приемоиндикаторов перспективных РНС.

Первый способ заключается в увеличении длины ПСП. К недостаткам этого способа относится существенное усложнение приемоиндикатора РНС и невозможность режима автономной работы наземной радионавигационной системы, обусловленной сложностью быстрого поиска сигнала ОС.

Второй способ заключается в применении компенсаторов «мешающих» сигналов. Для эффективной компенсации сигналов «мешающих» ОС необходима высокоточная оценка сразу нескольких параметров, а именно: амплитуды, доплеровского сдвига частоты и информационного символа. Осуществление такого оценивания с высокой точностью представляется возможным лишь в лабораторных условиях. В реальных условиях: неточность временной и фазовой синхронизации, наличие помех от других радиоэлектронных средств, а также значительное влияние среды распространения радиоволн и подстилающей поверхности (как правило, неоднородной) могут привести к невозможности точной компенсации сигналов «мешающих» ОС. Кроме того, в РНС состоящих из нескольких цепочек опорных станций возможна ситуация, когда приемоиндикатор должен обеспечить прием сигнала от наиболее удаленной из ОС на фоне сразу нескольких «мешающих» мощных сигналов, таким образом, требуется точная оценка еще большего количества параметров, что существенно усложняет реализацию.

Третий способ заключается в применении режима кодо-временного разделения (КВР) сигналов опорных станций высокоточной наземной РНС, входящей в интегрированную систему навигации. Режим КВР заключается в том, что в течение определенного периода работы ОС передается периодический ШПС-МЧМ без дополнительной цифровой модуляции ($D(t) = 1$); а в течение другого периода работы – ШПС-МЧМ с цифровой модуляцией ($D(t) = \pm 1, t \in [0; T_i]$). Таким образом, решается проблема увеличения динамического диапазона РНС до двух раз, а именно: режим КВР, в отличие от кодового разделения, при длине псевдослучайной последовательности $N \approx 20000$ обеспечивает динамический диапазон РНС до 70 дБ. К недостаткам этого способа следует отнести потери в скорости передачи информации в 2 раза. На рисунке 3 представлены некоторые из возможных вариантов реализации режима кодо-временного разделения сигналов опорных станций.

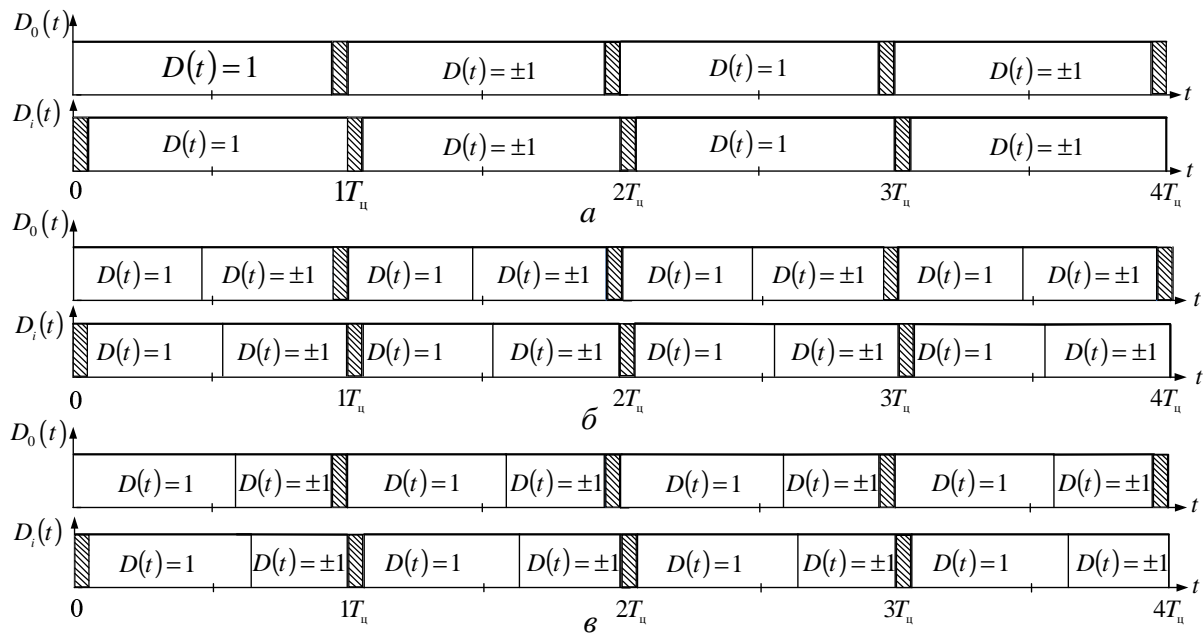


Рисунок 3 – Варианты реализации режима кодо-временного разделения сигналов

Рисунок 3, *а* соответствует случаю, когда в течение “нечётных” циклов работы ОС передается периодический ШПС-МЧМ без дополнительной цифровой модуляции; а в течение “чётных” циклов – ШПС-МЧМ с цифровой модуляцией. Рисунок 3, *б* соответствует случаю, когда каждый цикл работы ОС разделен на две равные части, в первую из которых передается периодический ШПС-МЧМ без дополнительной цифровой модуляции, а во вторую – ШПС-МЧМ с цифровой модуляцией. Заштрихованная область на рисунке 3 соответствует паузе в сигнале, причем у ведущей ОС пауза в конце каждого цикла, а у ведомых – в начале цикла.

Сравнительный анализ эффективности кодо-временного разделения как способа расширения рабочей зоны РНС демонстрируется на примере системы фазовой синхронизации (СФС) 2-го порядка астатизма с параметрами рассмотренными в [1].

На рисунке 4 представлены результаты статистического моделирования нестационарной СФС с начальным значением шумовой полосы $F_{\phi_i} = 0,5 \text{ \AA}$ и конечным значением $F_{\phi_e} = 0,1 \text{ \AA}$. Кривые 1 соответствуют случаю отсутствия дополнительной цифровой модуляции ($D(t) = 1$), кривые 2 соответствуют случаю кодо-временного разделения сигналов, кривые 3 – случаю совмещенного канала передачи данных. Представленные на рисунке 4 результаты моделирования СФС получены усреднением по $M = 500$ реализациям и соответствуют следующим условиям: отношение сигнал/шум $q = -40 \text{ дБ}$; частотная расстройка $|F_{\Delta}| = 0,2 \text{ Гц}$, разница амплитуды принимаемого и «мешающего» сигналов $\gamma_l = 70 \text{ \AA}$.

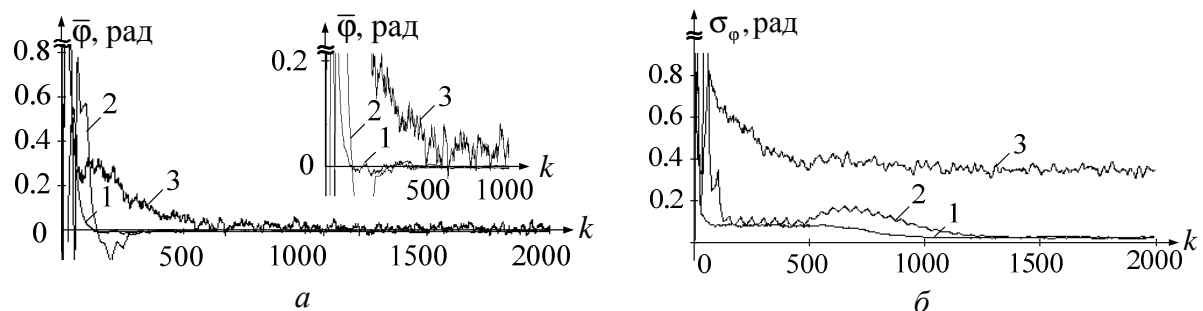


Рисунок 4 – Статистическая динамика нестационарной СФС 2-го порядка астатизма

В установившемся режиме для рассмотренных вариантов организации режима работы РНС среднее значение фазовой ошибки СФС $\bar{\varphi} \rightarrow 0$, при СКО фазовой ошибки $\sigma_{\varphi} \approx 0,05$ ддд в случае отсутствия дополнительной цифровой модуляции и в режиме кодо-временного разделения сигналов. Из рисунка 4 видно, что для случая совмещенного канала передачи данных работоспособность СФС не обеспечивается. А в случае КВР СФС обеспечивает захват и слежение с ошибкой не более $\sigma_{\varphi} \leq 0,05$ ддд.

Библиографический список

1. Kuzmin E. V. Accelerated Phase-lock-loop Frequency Control Methods of User's Equipment in Perspective Radio Navigation Systems // (Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Техника и технологии». Том 1, №3. С.276 – 286.)
2. Кокорин В.И. Радионавигационные системы и устройства / В.И. Кокорин. – Красноярск: КГТУ, 2006. – 175 с.
3. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами/ Л.Е. Варакин. – М.: Радио и связь, 1985 – 384 с.
4. Кузьмин Е.В. Методы равновесовой обработки шумоподобных сигналов с минимальной частотной манипуляцией // Электронное издание «Журнал радиоэлектроники» РАН № 9, 2007 – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep07/2/text.html>
5. Долуханов М.П., Распространение радиоволн. – М., «Связь», 1972, 366 с.