

Лекция 11. Демодуляция навигационного сообщения

Болденков Е.Н.

Московский Энергетический институт

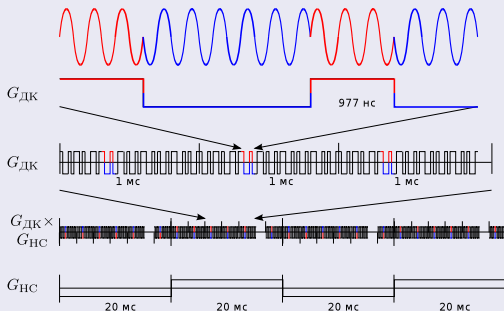
ноябрь 2015

Содержание

- 1 Передача навигационного сообщения
 - Способ модуляции данных
 - Характеристики блока демодуляции
 - Допустимая вероятность ошибки
- 2 Алгоритм демодуляции
 - Теоретическая основа алгоритма
 - Характеристики приёма данных
- 3 Реальность
 - Неточная фазовая синхронизация
 - Ошибки слежения за задержкой
 - Неточная символьная синхронизация
 - Относительная фазовая модуляция в ГЛОНАСС
 - Символьная синхронизация

Способ модуляции данных

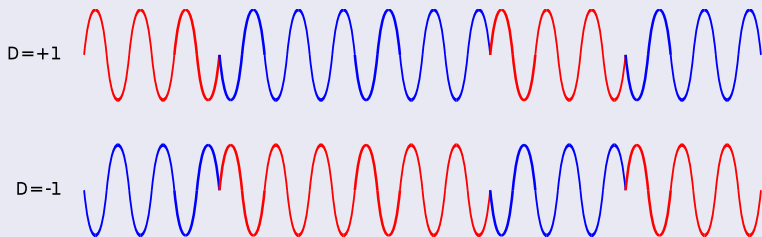
Сигнал передаётся с использованием двухуровневой фазовой манипуляции



$$s_{k,i} = A \cdot G_{\text{ДК}}(t_{k,i} - \tau_k) G_{\text{НС}}(t_{k,i} - \tau_k) \cos(\omega_0 t_{k,i} + \omega_k t_{k,i} + \varphi_k)$$

Способ модуляции данных

При использовании двухуровневой фазовой манипуляции значения битов данных передаются противоположными сигналами



Способ модуляции данных

Длительность бита данных

| Сигнал | Длительность бита | Скорость |
|---------------|-------------------|------------|
| ГЛОНАСС ПТ | 20 мс | 50 симв/с |
| ГЛОНАСС L1OCd | 4 мс | 250 симв/с |
| ГЛОНАСС L3OCd | 5 мс | 200 симв/с |
| GPS C/A | 20 мс | 50 симв/с |
| Galileo E1 | 8 мс | 125 симв/с |
| GPS L1C | 20 мс | 50 симв/с |
| SBAS | 2 мс | 500 симв/с |

Способ модуляции данных

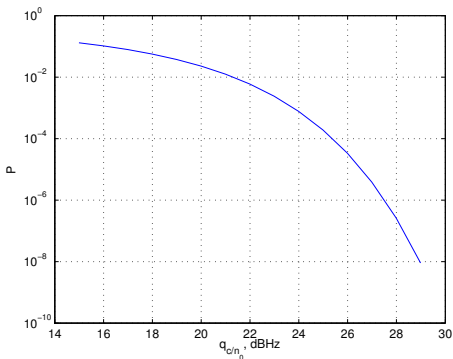
Кроме модуляции существенное значение имеет вид кодирования

| Сигнал | Кодирование |
|---------------|----------------------------|
| ГЛОНАСС ПТ | Код Хэмминга |
| ГЛОНАСС L10Cd | Свёрточный код $K=7 R=1/2$ |
| ГЛОНАСС L30Cd | Свёрточный код $K=7 R=1/2$ |
| GPS C/A | Аналог кода Хэмминга |
| GPS L2C | Свёрточный код $K=7 R=1/2$ |
| Galileo E1 | Свёрточный код $K=7 R=1/2$ |
| GPS L1C | LDPC-код |
| SBAS | Свёрточный код $K=7 R=1/2$ |

Применение помехоустойчивого кодирования даёт выигрыш несколько децибел.

Характеристики блока демодуляции

Основная характеристика - зависимость вероятности ошибки на бит от отношения мощности сигнала к спектральной плотности шума



Какая вероятность ошибки допустима?

Объём данных, необходимых для решения навигационной задачи

| Сигнал | Объём данных |
|------------|--------------|
| ГЛОНАСС ПТ | 1358 |
| GPS L1 C/A | 1200 |
| GPS L1C | 1760 |

Таким образом, нужно принять $1 \dots 2 \times 10^3$ бит данных.

Какая вероятность ошибки допустима?

Нужно принять $1 \dots 2 \times 10^3$ бит данных.

Если задать вероятность неудачного приёма всего блока навигационных данных в целом 0.01, то допустимая вероятность ошибки на один бит будет порядка 10^{-5} .

Теоретическая основа алгоритма

Входные наблюдения имеют вид

$$y_{k,i} = D_k \times A \times s_{k,i} + n_{k,i}, \quad t_{k,i} \in [t_k; t_{k+1}]$$

где

- D_k — принимаемый бит данных ($D \in \{\pm 1\}$),
- $[t_k; t_{k+1}]$ — соответствующий данному биту временной интервал длительностью T ,
- $s_{k,i}$ — сигнал, структура и все параметры которого считаются известными,
- $n_{k,i}$ — аддитивный шум наблюдений, полагаемый дискретным белым гауссовским дисперсией σ_n^2 .

Теоретическая основа алгоритма

А что известно о самом сообщении?

Обычно сообщение полагается неизвестным с независимыми равномерно распределёнными значениями символов. В бинарном случае это означает

$$p(D_k = +1) = p(D_k = -1) = \frac{1}{2},$$

$$p(D_k, D_{k+1}) = p(D_k) \cdot p(D_{k+1}).$$

Теоретическая основа алгоритма

Рассматриваемая задача называется задачей различения двух сигналов

один сигнал: $+1 \times s_{k,i}$

второй сигнал: $-1 \times s_{k,i}$

Данные сигналы называются противоположными.

Теоретическая основа алгоритма

Из теории оптимально приёма следует, что нужно искать максимум функции правдоподобия

Для бинарного сообщения это приводит к алгоритму:

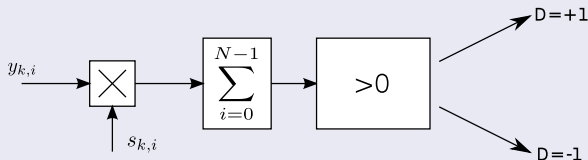
$$\hat{D}_k = \begin{cases} p(Y_{t_k}^{t_{k+1}} | D_k = +1) \geq p(Y_{t_k}^{t_{k+1}} | D_k = -1) & \Rightarrow +1, \\ p(Y_{t_k}^{t_{k+1}} | D_k = +1) < p(Y_{t_k}^{t_{k+1}} | D_k = -1) & \Rightarrow -1. \end{cases}$$

Теоретическая основа алгоритма

Учитывая то, что шумы аддитивные гауссовские, а параметр неэнергетический, алгоритм можно привести к сравнению корреляционных интегралов:

$$\hat{D}_k = \begin{cases} \sum_{i=0}^{N-1} y_{k,i} \cdot s_{k,i} \geq 0 & \Rightarrow +1, \\ \sum_{i=0}^{N-1} y_{k,i} \cdot s_{k,i} < 0 & \Rightarrow -1, \end{cases}$$

Структура блока приёма данных



Характеристики приёма данных

Характеристики приёма противоположных сигналов хорошо известны

$$P = \Phi \left(\sqrt{2 \frac{E_b}{N_0}} \right)$$

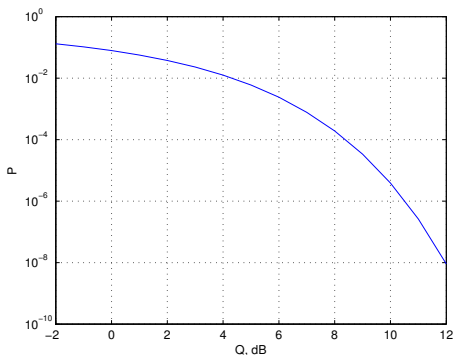
Пересчёт из q_c/n_0

$$q_c/n_0 = \frac{P_c}{N_0}$$

$$Q = \frac{E_b}{N_0} = \frac{P_c \cdot T}{N_0} = q_c/n_0 \times T$$

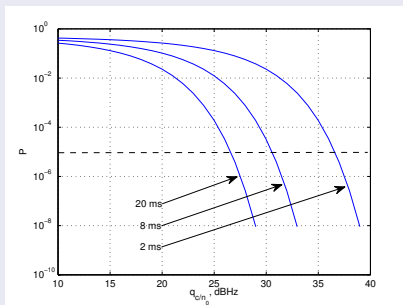
Характеристики приёма данных

Таким образом, характеристики приёма зависят только от отношения сигнал/шум на длительности символа и не зависят от структуры сигнала



Характеристики приёма данных

Обычно интересно предельное значение q_{c/n_0} при достижении заданной вероятности



Оно фактически зависит только от длительности бита данных.

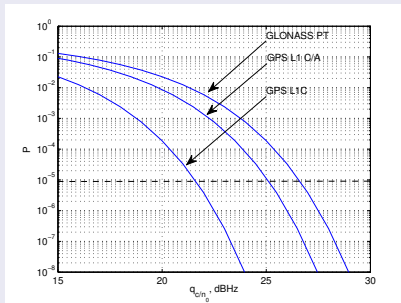
Характеристики приёма данных

Предельное значение q_c/n_0 для разных сигналов

| Сигнал | Бит | Скорость | Предел q_c/n_0 |
|------------|-------|-----------|------------------|
| ГЛОНАСС ПТ | 20 мс | 50 бит/с | 27 дБГц |
| GPS C/A | 20 мс | 50 бит/с | 27 дБГц |
| Galileo E1 | 8 мс | 125 бит/с | 31 дБГц |
| GPS L1C | 20 мс | 50 бит/с | 27 дБГц |
| SBAS | 2 мс | 500 бит/с | 37 дБГц |

Отличия реальной вероятности от теоретической

Обычно используется помехоустойчивое кодирование



Помехоустойчивое кодирование позволяет выиграть несколько децибел - это тема следующей лекции

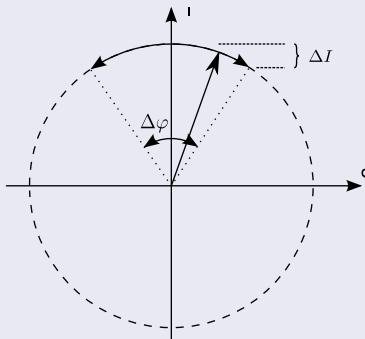
Отличия реальной вероятности от теоретической

Есть и ухудшающие факторы

- неточная фазовая синхронизация;
- неточная слежение за задержкой;
- неточная символьная синхронизация;
- относительная фазовая модуляция в ГЛОНАСС;
- ограниченная разрядность в декодере.

Неточная фазовая синхронизация

Наличие ошибок слежения по фазе не позволяет полностью накопить сигнал



Неточная фазовая синхронизация

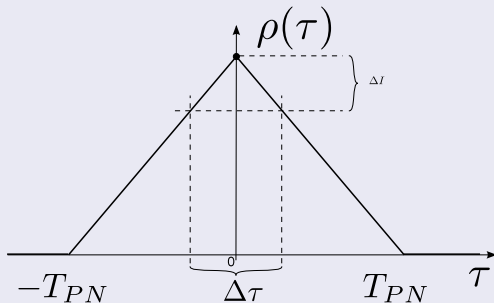
Потери на влияние неточности по фазе можно учесть:

$$L_{\varphi} = 10 \cdot \lg \left(\int_{\pi}^{+\pi} p(\varphi) \cos^2(\varphi) d\varphi \right)$$

При слежении на пределе работы ФАП СКЗ ошибки по фазе достигает 10^0 , внося потери 1 дБ.

Ошибки слежения за задержкой

При смещении по задержке коррелятор следит не за максимумом АКФ



Ошибки слежения за задержкой

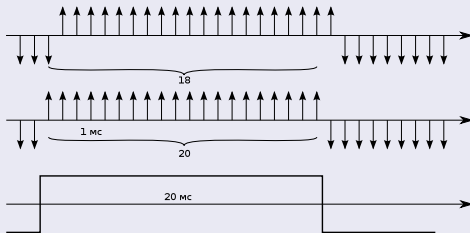
Потери на влияние неточности по фазе можно учесть:

$$L_{\tau} = 10 \cdot \lg \left(\int_{T_{PN}}^{+T_{PN}} p(\tau) \rho^2(\tau) d\tau \right)$$

Слежение при 25 дБГц даёт СКЗ ошибки по задержке 5 м.
Этому соответствуют потери около 0.5 дБ.

Неточная символьная синхронизация

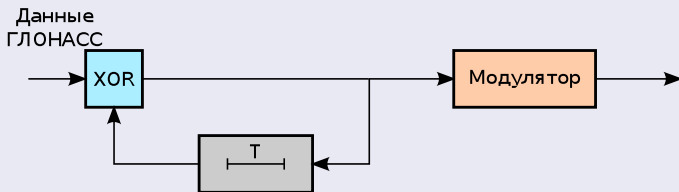
Ошибка оценки положения границ символов также может приводить к увеличению потерь



Потери рассчитываются аналогично влиянию слежению за задержкой. Однако шаг перестройки по задержки дискретный, равен длине дальномерного кода. Обычно такие ошибки отсутствуют.

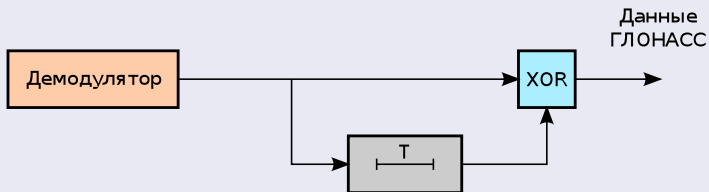
Относительная фазовая модуляция

В сигнале ГЛОНАСС ПТ используется относительная фазовая модуляция



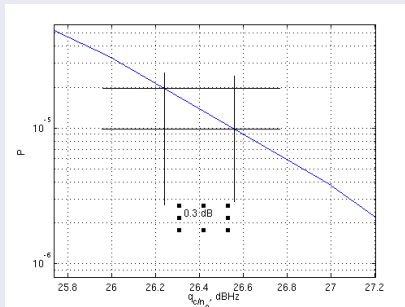
Относительная фазовая модуляция

Декодер относительной фазовой модуляции



Относительная фазовая модуляция

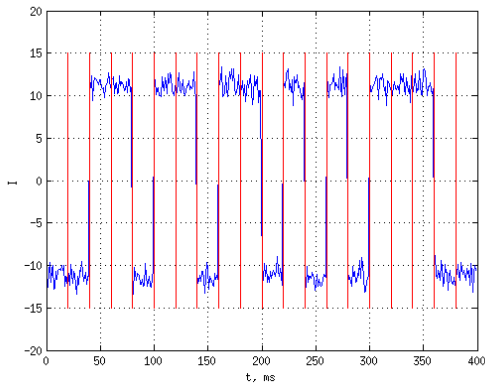
При относительной фазовой модуляции возникают двойные ошибки



В результате вероятность ошибки в пересчёте на символ в 2 раза выше, что приводит к потерям 0.3 дБ.

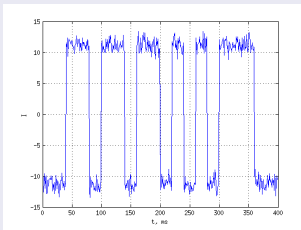
Символьная синхронизация

Перед демодуляцией необходимо определить границы символов

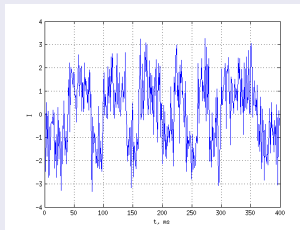


Символьная синхронизация

При низком отношении сигнал/шум границы символов не очевидны



45 дБГц

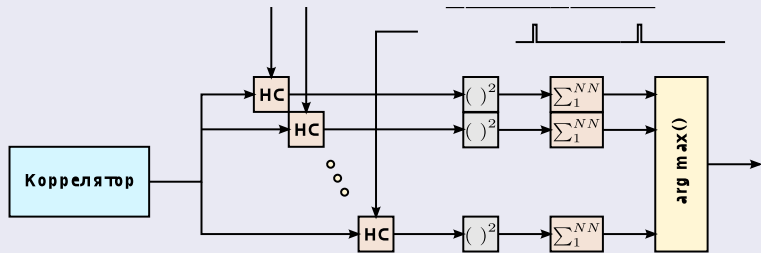


25 дБГц

Цена ошибки синхронизации на 1 мс — 300 км в псевдодальности!

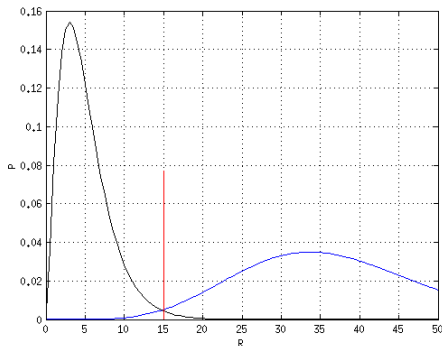
Алгоритм символьной синхронизации

Структура алгоритма



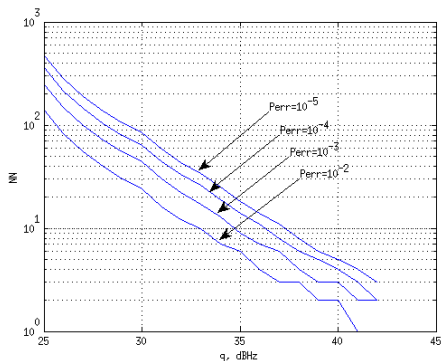
Анализ характеристик алгоритма символьной синхронизации

Рассчитать характеристики символьной синхронизации можно с помощью распределения χ^2



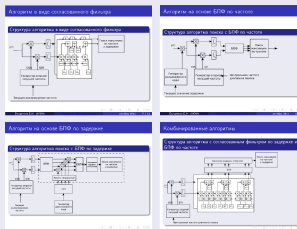
Анализ характеристик алгоритма символьной синхронизации

Требуемое количество некогерентных накоплений NN



Следующая лекция

Тема следующей лекции - декодирование навигационных данных



Посетите наш web-сайт

<http://srns.ru>

