# **УДК 629.783**

Модернизация алгоритма поиска сигнала радиоприемного устройства межспутниковой радиолинии ГЛОНАСС

Гончаров О.А. бакалавр, Астахов Д.А. магистр, Салахов Р.Ф специалист

АО Российские Космические Системы

[oleggonch12@gmail.com](mailto:oleggonch12@gmail.com)

**Аннотация**

В данной статье затрагивается тема оптимизации поиска сигнала межспутниковой радиолинии для системы ГЛОНАСС. Авторы статьи провели независимое моделирование когерентного и некогерентного обнаружения сигнала. По полученным результатам стало возможным уменьшение аппаратных затрат, связанных с поиском сигнала межспутниковой радиолинии.

**Ключевые слова**: межспутниковая радиолиния, когерентное накопление, некогерентное накопление, поиск сигнала, энергетический расчет межспутниковой радиолинии

# **Введение**

Предварительным этапом навигационно-временных определений будет поиск радионавигационного сигнала из излучаемых созвездием спутников.

Пусть на вход приемника межспутниковой радиолинии поступает реализация , представляющая собой аддитивную смесь сигнала и помехи :

Где – неинформативные параметры;

– вектор параметров сигнала;

– дискретный параметр, несущий дополнительную навигационную информацию.

Сигнальная функция от *j* – го навигационного спутника описывается:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

Где – амплитуда сигнала; – функция модуляции дальномерным кодом и навигационным сообщением (вся терминология не соответствует документам по структуре сигнала и ЦИ в МРЛ); – несущая частота; – случайная начальная фаза сигнала.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

По принятой реализации осуществляется оптимальный поиск сигнала, откуда выделяется вектор состояния навигационного спутника и информация о спутниках, участвующих в измерениях. Предварительно стоит определиться с энергетикой межспутниковой радиолинии, откуда осуществим синтез обнаружителя сигнала.

# **Энергетика межспутниковой радиолинии**

Аппаратура межспутниковых измерений должна обеспечивать непрерывное функционирование системы, работающая в соответствии с заданной циклограммой и по соответствующим полиномам, обеспечивающим кодовое разделение. Сохраняя идею преемственности и исходя из требований технического задания каждый навигационный спутник системы должен связываться с остальными, находящимися в области видимости его приемной аппаратуры без изменения циклограммы функционирования. Для этого антенна бортовой аппаратуры межспутниковых измерений (БАМИ) имеет диаграмму направленности равномерную в азимутальной плоскости. В угломестной плоскости диаграмма направленности имеет конусообразный вырез, центр которого направлен на центр земли для исключения влияния помех со стороны других систем и исключает влияние шумов от поверхности Земли.

Коэффициенты усиления (КУ) КА(α) представлены в таблице 1.1, значения которых были взяты из Рис.1.1.



*Рис.1.1. Зависимость коэффициента усиления в зависимости от угла визирования*

Измерения параметров антенн проводились при длине волны: λ = 0.136 м.

Как указано в литературе [1]: затухание сигнала на максимальной дальности (по мощности):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

Тогда для затухания сигнала от i – го НС можно записать выражение:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |

или в децибелах  = - 193,4 дБ + 2КА(α) дБ - 20 lg(cosα) (5)

Значения LR при разных α приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Зависимость КУ и коэффициента затухания от угла визирования

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| α, град | 37 | 50 | 60 | 70 | 80 | 85 |
| , дБ | + 4.6 | + 4.5 | + 3 | + 1,5 | − 1,5 | − 3 |
| , дБ | − 182,64 | − 180,96 | − 181,37 | − 181,08 | − 181,19 | − 178,2 |

В диапазоне углов 370..... 850 минимальное значение LR= - 182,24дБ.

Температура шума входного устройства приёмника составляет:

- 2600К при наличии на входе схемы защиты от передатчика

- 1500К, без схемы защиты от передатчика

Из литературы [2] известно, что спектральная плотность входного шума приёмника составит -204 дБВт/Гц или -206 дБВт/Гц.

Потери в тракте АФУ и циркуляторе не превышают 1,8 дБ.

Таким образом, энергопотенциал радиолинии в диапазоне углов 370…850 при наличии защиты будет равен:

|  |  |
| --- | --- |
| H = ( -182,24 + 19 + 204 – 2х1,8) = 37.16 дБ/Гц  Либо H = ( -182,24 + 19 + 206 – 2х1,8) = 39.16 дБ/Гц | (6) |

Без схемы защиты энергопотенциал составит 39.16 дБ/Гц. С защитой 37.16 дБ/Гц

В расчете потенциала не учтены поляризационные потери.

Если принять запас на все неучтённые потери равным 2.16 дБ/Гц, то расчётное значение энергопотенциала межспутниковой радиолинии составит:

- 35 дБ/Гц с защитой

- 37 дБ/Гц без защиты.

# **Обоснование результатов моделирования поиска сигнала межспутниковой радиолинии**

Основной задачей поиска сигналов является формирование предварительной (грубой) оценки его параметров. Данная задача решается на ограниченном интервале времени Т, длительность которого определяется требуемой вероятностью правильного поиска, а также условием постоянства оцениваемых параметров (или малости их изменения). Особенностью рассматриваемой задачи является определенность циклограммы функционирования аппаратуры межспутниковой радиолинии (МРЛ) рис.2.1.

Начальными условиями задачи будут:

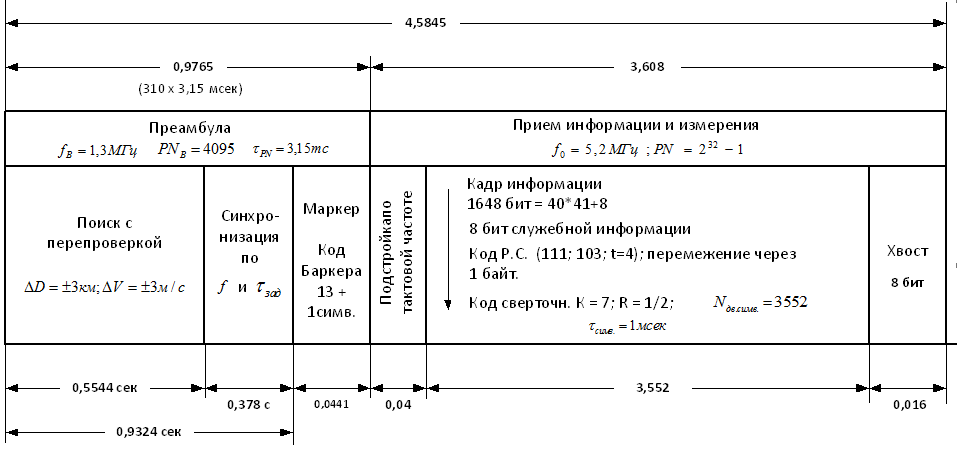
* Вероятность ложной тревоги для всей процедуры поиска;
* Требуемое значение вероятности правильного обнаружения;
* Диапазон отношения сигнал/шум;
* Диапазон поиска по дальности и скорости;

Конечными результатами, которые будут определять структуру приемника, будут:

* Количество корреляторов, необходимых для обработки сигнала при параллельном либо последовательном поиске;
* Время накопления сигнала;
* Обоснование схемы обнаружителя сигнала (интегрирование в корреляторе; некогерентное накопление выходных отсчетов корреляционных сумм; комбинированный ― интегрирование в корреляторе с некогерентным накопление отсчетов на его выходе);
* Если обнаружитель комбинированный, то необходимо определиться с числом некогерентных суммирований и временем накопления в корреляторе; если обнаружитель только с использованием интегрирования в корреляторе, то необходимо определиться с длительностью интегрирования, при которых обеспечивается требуемая величина вероятности правильного обнаружения при заданном отношении сигнал шум.

Рассмотрим четыре варианта возможного решения задачи обнаружения сигнала:

* Накопление в корреляторе на интервале времени равного длительности периода псевдослучайной последовательности (ПСП) (3.15 мс);
* Накопление в корреляторе на интервале времени равного утроенной длительности периода ПСП (9.45 мс);
* Некогерентный обнаружитель с накоплением в корреляторе на интервале времени, равном длительности периода ПСП (3.15 мс) с выбором необходимого числа некогерентных суммирований.
* Комбинированный обнаружитель с накоплением в корреляторе на интервале времени, равном двум периодам ПСП (6.3 мс) с выбором необходимого числа некогерентных суммирований.



*Рис.2.1. Структура пакета БАМИ*

Для всех случаев определимся с числом анализируемых ячеек поиска.

Как видно из Рисунка 2.1: длительность интервала поиска составляет 0.5544 сек. На начало каждого сеанса поиска сигнала задано, что неопределенность по дальности составляет 6 км, откуда рассчитываем неопределенность по задержке - 20 мкс. Следовательно, область возможных значений поиска задержки сигнала [0;20] мкс. Согласно литературе [1]: зная длительность символа псевдослучайной последовательности получаем число ячеек поиска по задержке ― 52. Также из документа «Структура информационно-измерительных радиосигналов, излучаемых в межспутниковой радиолинии» задано, что неопределенность по скорости составляет 6 м/с. Откуда получаем интервал неопределенности по доплеровской частоте ― 44 Гц.

В [1] рекомендовано размер ячейки поиска по частоте выбирать с учетом соотношения:

где Т – длительность интервала накопления в корреляторе.

Согласно порядку временного разделения, из таблицы 2.1 - за выделенный диапазон времени осуществляется сеанс межспутниковых измерений с 6 НС в ОГ. В ОГ будут формироваться 6 корреляционных сумм. Примечание: число данных корреляционных сумм будет справедливо для схемы последовательного поиска на корреляторе.

Таблица 2.1. Порядок временного разделения между излучающими КА в соответствии с номером системной точки КА

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № плоскости | 1-й интервал времени | 2-й интервал времени | 3-й интервал времени | 4-й интервал времени |
| 1-я плоскость | 1, 5 | 2, 6 | 3, 7 | 4, 8 |
| 2-я плоскость | 9, 13 | 10, 14 | 11, 15 | 12, 16 |
| 3-я плоскость | 17, 21 | 18, 22 | 19, 23 | 20, 24 |

# **Обнаружитель с накоплением на интервале периода ПСП**

Как указано в [1]: величины отсчетов корреляционных сумм можно считать практически независимыми, так как корреляционная функция между ними практически равна нулю. Поэтому при наличии сигнала плотность вероятности случайной величины определяется законом Райса (7).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7) |

При отсутствии сигнала случайные величины I и Q также независимы и распределены по нормальному закону с нулевыми математическими ожиданиями и одинаковыми дисперсиями (8). Поэтому плотность вероятности случайной величины будет рэлеевской (9).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (8) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (9) |

Вероятность ложной тревоги определяется выражением:

Где – нормированная величина порога

В спутниковой радионавигации энергетические характеристики приема описываются через отношение сигнал/шум, представляющее собой отношение мощности сигнала к мощности внутреннего шума в полосе 1 Гц. При этом формула вероятности правильного обнаружения будет иметь вид.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (10) |

Из энергетического расчета известно, что отношение сигнал/шум, полученное из энергетического расчета для схемы с защитой составляет **35 дБ/Гц**.

По вероятности правильного обнаружения при заданном отношении сигнал/шум будем судить о факте наличия сигнала.

Моделирование было проведено в среде MATLab методом статистических эквивалентов, рекомендации по которому были предоставлены в [3]. Результат построения характеристики обнаружения показан на рис. 2.2.



*Рис.2.2. Характеристика обнаружения когерентного накопления при времени интегрирования 3.15 мс*

Результатом моделирования явилось:

* При заданном отношении сигнал/шум (35 дБ/Гц) вероятность правильного обнаружения равна 0.45;
* Требуемая вероятность правильного обнаружения (0.95) обеспечивается при отношении сигнал/шум в **39 дБ/Гц**.

Таким образом, для того чтобы достичь требуемый порог вероятности правильного обнаружения необходимо: увеличить время накопления в корреляторе, либо применить схему некогерентного суммирования на выходе корреляторов или применить оба метода вместе. Первый случай может быть опасен тем, что при увеличении времени интегрирования в корреляторе будет уменьшаться шаг поиска по частоте, откуда возможно увеличение числа анализируемых ячеек по доплеровской частоте.

# **Когерентное накопление на утроенном интервале периода ПСП**

Рассмотрим случай построения характеристик обнаружения при когерентном накоплении в корреляторе на утроенном периоде ПСП. Все аналитические соотношения, по которым строилась модель когерентного обнаружителя в среде MATLab, были описаны выше. Результат моделирования приведен на рис.2.3.



*Рис.2.3. Характеристика обнаружения когерентного накопления при времени интегрирования 9.45 мс*

Таким образом, при увеличении времени накопления в корреляторе - вероятность правильного обнаружения по отношению сигнал шум в 35 дБ/Гц равна 0.99, что превышает минимально требуемую ее величину (0.95). Отсюда увеличение времени интегрирования в три раза обеспечивает необходимое качество обнаружения сигнала при когерентном накоплении. Также стоит отметить, что число анализируемых ячеек поиска по задержке и частоте не претерпело изменения относительно времени накопления в 3.15 мс (52 ячейки).

# **Некогерентное накопление на интервале периода ПСП**

Одним из путей выхода из сложившейся ситуации с когерентным накоплением (возможное уменьшение времени поиска) на интервале времени периода ПСП - это применений некогерентного накопления. Суть которого состоит в том, что будут накапливаться выходные отсчеты с выхода сумматора квадратов корреляционных сумм.

Рассмотрим характеристики обнаружения сигнала при использовании некогерентного накопления квадратов выходных отсчетов коррелятора. Величины I(T) и Q(T) будут независимыми гауссовскими случайными величинами с математическими ожиданиями   
.

При накоплении квадратов выходных отсчетов, где присутствует сигнал, случайная величина Rподчиняется нецентральному распределению, для которого плотность вероятности определяется выражением (11).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (11) |

Где

В ячейках, где отсутствует сигнал, случайная величина R подчиняется центральному распределению с плотностью вероятности:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (12) |

Где

Вероятность ложной тревоги для одной ячейки равна:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (13) |

Где *h* это величина порога сравнения.

Вероятность правильного обнаружения определяется из соотношения:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (14) |

Где ; .

Перебором значений числа некогерентных суммирований отсчетов с выхода сумматора квадратов корреляционных сумм, времени интегрирования и определением числа параллельных корреляторов, участвующих в обработке сигнала надо получить оптимальное значение, которое будет удовлетворять условию равенства или превышения вероятности правильного обнаружения величиною в 0.95 при отношении сигнал шум 35 дБ. Сигнал/шум было определено из энергетического расчета.

Подставив все исходные значения в компьютерную модель в среде MATLab, которая была описана методом статистических эквивалентов, рекомендации по которому были предоставлены в [3], получим что число некогерентных суммирований, обеспечивающие превышение вероятности правильного обнаружения величиною 0.95 равно 5 (NN = 5). Характеристика обнаружения для этого случая показана на рис. 2.4.

Общая длительность поиска не будет укладываться в интервал времени, при последовательном поиске на одном корреляторе. Но вполне будет входить в диапазон времени поиска МРЛ на двух корреляторах (применение параллельного поиска).



*Рис.2.4. Характеристика обнаружения некогерентного накопления при времени интегрирования 3.15 мс при 5 некогерентных суммированиях*

# **Некогерентное накопление на удвоенном интервале периода ПСП**

Рассмотрим случай построения характеристик обнаружения при некогерентном накоплении в корреляторе на удвоенном периоде ПСП. Все аналитические соотношения, по которым строилась модель некогерентного обнаружителя в среде MATLab были описаны выше. Результат моделирования приведен на рис.2.5. Остается определить оптимальное число некогерентных суммирований с выходов корреляторов в модели.



*Рис.2.5. Характеристика обнаружения некогерентного накопления при времени интегрирования 6.3 мс при 2 некогерентных суммированиях*

По проведенному моделированию видно, что на удвоенном интервале интегрирования (на удвоенном интервале когерентного накопления 6.3 мс) необходимо провести как минимум два некогерентных суммирования (NN = 2).

Таким образом, применение данной схемы накопления тоже не будет укладываться в диапазон времени, выделенный на последовательный поиск на одном корреляторе, поэтому снова следует применить два коррелятора на процедуру поиска.

**Выводы:**

1. Для просмотра всего временного интервала времени, данного на поиск сигнала МРЛ, выделено 0.5544 с. При тактовой частоте ПСП-В 1,3 МГц и шаге поиска τс /2 необходимо 176 шагов для просмотра всего диапазона времени.
2. По проведенным выше результатам моделирования видно, что наиболее наилучшей схемой накопления будет накопление сигнала на интервале времени равного трем периодам ПСП в каждой ячейки поиска (по сравнению с остальными потребуется меньшее время поиска). Таким образом время просмотра составит 9.45мс\*52 = 0.4914 с, что укладывается в диапазон поиска выделенный циклограммой функционирования МРЛ.
3. Из пункта 2 следует, что можно использовать последовательный поиск на одном корреляторе с временем накопления 9.45 мс.
4. Преимуществом схемы накопления на утроенном периоде ПСП будет уменьшение аппаратных затрат в девять раз (будет использован один коррелятор вместо девяти).

**Список литературы**

[1] ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. Изд. 4 – е перераб. и доп. – М. Радиотехника, 2010, 800с, ил.

[2] Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Высшая школа, 1998.

[3] Борисов Ю.П., Цветнов В.В. Математическое моделирование радиотехнических систем и устройств – М.: Радио и связь, 1985 – 176 с., ил.