

Научная статья

УДК 621.3.088

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-9-16-22>

Метод измерений парциальных мощностей сигналов глобальных навигационных спутниковых систем

Алексей Сергеевич Завгородний

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл., Россия, zavgor@vniiftri.ru

Аннотация. Рассмотрены проблемы принятия потребителями различных комбинаций сигналов глобальных навигационных спутниковых систем и контроля параметров каждого из сигналов отдельно. Существующие методы контроля парциальных характеристик сигналов основаны на корреляционной обработке, что приводит к потере измерительной информации и усреднению сигнала. Для устранения указанных недостатков разработан метод измерений парциальных мощностей навигационных сигналов с частотным и кодовым разделением. Исходными данными для разработанного метода являются результаты измерений спектральной плотности мощности суммы сигналов, а также информация о форме парциальных спектральных плотностей мощности. Исследована математическая модель суммы сигналов с перекрывающимися спектрами. Показано, что мощности сигналов соотносятся как весовые коэффициенты при парциальных спектральных плотностях мощности. Составлена и решена методом Тихонова система уравнений относительно весовых коэффициентов. Практически исследованы метрологические характеристики метода. Результаты исследований можно использовать при решении задач контроля технического состояния навигационных космических аппаратов.

Ключевые слова: метод измерений, мощность сигналов, ГЛОНАСС, спектральная плотность мощности, сигналы с кодовым разделением

Для цитирования: Завгородний А. С. Метод измерений парциальных мощностей сигналов глобальных навигационных спутниковых систем // Измерительная техника. 2021. № 9. С. 16–22. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-9-16-22>

The global navigation systems satellites signals partial powers measuring method

Aleksei S. Zavgorodnii

Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleevo, Moscow Region, Russia, zavgor@vniiftri.ru

Abstract. Different consumers of global navigation satellite systems signals are able to receive different combinations of them. For this reason, it is important to monitor the signal parameters separately. The existing partial signals characteristics measuring methods are based on correlation processing, which leads to the loss of measurement information and signal averaging. A method for measuring the partial powers of navigation signals with frequency and code division was developed. The initial data are the total spectral power density measurements results, as well as information on the shape of the partial spectral power densities. A mathematical model of the sum of signals with overlapping spectra was investigated. It was shown that the signal powers were related as coefficients at partial spectral power densities. A system of equations for the coefficients is compiled, its solution is presented by the Tikhonov method. A practical study of the metrological characteristics of the method has been carried out. The research results will be used during monitoring the navigation spacecraft technical condition.

Keywords: signal power measuring method, GLONASS, power spectral density, code division signals

Введение. Мощность радиосигнала – одна из основных радиотехнических характеристик. Для сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) эта характеристика нормирована в соответствующих интерфейсных контрольных документах^{1, 2}. Для ГЛОНАСС в диапазоне частот L1

¹ Интерфейсный контрольный документ, редакция 5.1 [Электронный ресурс] // URL: <http://russianspacesystems.ru/bussines/navigation/glonass/interfeysnyy-kontrolnyy-dokument/> (дата обращения: 01.06.2021).

² Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС – общее описание системы с кодовым разделением сигналов, редакция 1.0. [Электронный ресурс] // URL: <http://russianspacesystems.ru/bussines/navigation/glonass/interfeysnyy-kontrolnyy-dokument/> (дата обращения: 01.06.2021).

мощность сигналов с частотным разделением в приземном слое должна составлять не менее 161 дБВт, для перспективных сигналов с кодовым разделением –158,5 дБВт при приеме линейно-поляризованной антенной с коэффициентом усиления 3 дБ. Для оценки радиотехнических параметров сигналов ГНСС в 2015 г. во ВНИИФТРИ создан специализированный метрологический комплекс оценки энергетических характеристик навигационных сигналов (МК ОЭХ) и с этого времени регулярно измеряются характеристики сигналов навигационных космических аппаратов (НКА).

Развитие ГЛОНАСС в настоящее время идет по пути усложнения структуры сигнала. Перспективные НКА будут излучать сигналы с кодовым и частотным разделением одновременно.

Несущие частоты этих сигналов выбраны настолько близко друг к другу, что занимаемые полосы частот могут перекрываться. Более того, на каждой несущей частоте НКА излучает сигналы для гражданских и специальных потребителей³, т. е. в сравнительно узком диапазоне частот, в одной и той же полосе сосредоточены спектры нескольких сигналов. Разделение сигналов с перекрывающимися спектрами классической фильтрацией невозможно, средства измерений спектра и мощности могут измерять только суммарные характеристики этой группы сигналов (полосовую мощность, огибающую общей спектральной плотности мощности и т. д.). Для измерений параметров каждого сигнала отдельно требуется дополнительная обработка.

Цель статьи – разработка метода, позволяющего оценить парциальные мощности сигналов с перекрывающимися спектрами.

Математическая модель. Предполагается, что в диапазонах частот L1, L2 одновременно будут излучаться сигналы с частотным и кодовым разделением. Поскольку ситуация для обоих диапазонов идентичная, далее рассмотрим один диапазон частот L1. Пусть в диапазоне частот L1 в полосе Π излучаются четыре навигационных сигнала. Два из них – сигналы стандартной точности с частотным и кодовым разделением, структура которых известна и описана в открытых источниках. Структура двух других не приводится в открытой печати. (Далее будет показано, что эта информация для оценки энергетических характеристик навигационных сигналов не требуется.)

Навигационные сигналы s , излучаемые НКА, можно считать ортогональными в радиотехническом смысле [1], т. е. на достаточно большом интервале времени T (интервал T должен быть не меньше периодов повторения дальномерного кода сигналов s_i, s_j) для навигационных сигналов выполняется следующее условие:

$$\int_T s_i(t)s_j(t)dt \approx 0, \quad i \neq j,$$

где t – время (переменная интегрирования размерностью секунды).

Средняя мощность суммы двух ортогональных сигналов рассчитывается как

$$P_{12} = \frac{1}{T} \int_T (s_1(t) + s_2(t))^2 dt = \frac{1}{T} \left[\int_T (s_1(t))^2 dt + 2 \int_T s_1(t)s_2(t)dt + \int_T (s_2(t))^2 dt \right] = P_1 + P_2,$$

где P_1, P_2 – мощности ортогональных сигналов.

Аналогично можно показать, что суммарная мощность четырёх сигналов также является алгебраической суммой их мощностей. Суммарную мощность P_Σ сигналов в полосе

Π и огибающую спектральной плотности мощности (СПМ) S_Σ суммы сигналов можно непосредственно измерить анализатором сигналов. Эти величины связаны соотношением

$$P_\Sigma = \int_\Pi S_\Sigma(\omega) d\omega,$$

где ω – циклическая частота (переменная интегрирования размерностью радиан в секунду).

Также P_Σ можно выразить как сумму мощностей P_i ортогональных сигналов, каждая из которых – интеграл от собственной парциальной СПМ сигнала:

$$P_\Sigma = \sum_{i=1}^4 P_i = \sum_{i=1}^4 \left[\int_\Pi S_i(\omega) d\omega \right] = \int_\Pi \sum_{i=1}^4 S_i(\omega) d\omega,$$

где S_i – СПМ четырёх навигационных сигналов s_i .

Следовательно, огибающую СПМ всех ортогональных сигналов в полосе Π можно найти как сумму их СПМ:

$$P_\Sigma = \int_\Pi S_\Sigma(\omega) d\omega = \int_\Pi \sum_{i=1}^4 S_i(\omega) d\omega; \quad (1)$$

$$S_\Sigma(\omega) = \sum_{i=1}^4 S_i(\omega) d\omega.$$

СПМ S_i сигнала зависит от временной реализации сигнала, т. е. от вида модуляции. Навигационные сигналы представляют собой сигналы с фазовой манипуляцией различного вида и сложности (как сигналы с частотным разделением, так и перспективные сигналы с кодовым, а также сигналы с цифровым смещением частоты – так называемые ВОС-сигналы (binary offset carrier modulated) [2]). Это означает, что S_i можно выразить как

$$S_i(\omega) = \left| \int_T s_i(t) e^{-j\omega t} dt \right|^2 = \left| \int_T A_i \cos(\omega t + \varphi_i(t)) e^{-j\omega t} dt \right|^2, \quad (2)$$

где A_i – амплитуда сигнала (постоянна для сигналов с классической фазовой модуляцией); φ_i – слагаемое фазы сигнала, определяющее вид модуляции.

Интеграл в (2) представляет собой прямое преобразование Фурье от временной реализации сигнала и называется его спектральной плотностью или спектром. Поскольку амплитуда – величина постоянная и строго положительная, то её можно вынести за знак интеграла и модуля:

$$S_i(\omega) = \left| A_i \int_T \cos(\omega t + \varphi_i(t)) e^{-j\omega t} dt \right|^2 = A_i^2 \left| \int_T \cos(\omega t + \varphi_i(t)) e^{-j\omega t} dt \right|^2 = A_i^2 f_i(\omega).$$

Таким образом, СПМ представим как произведение константы и некоторой функции частоты, которую найдём как квадрат от прямого преобразования Фурье сигнала с единичной амплитудой. Если известна СПМ f_i (а значит, и результат интегрирования СПМ в полосе Π), то задача

³ Интерфейсный контрольный документ для сигналов ГЛОНАСС с кодовым разделением в диапазоне L1, редакция 1.0. [Электронный ресурс] // URL: <http://russianspacesystems.ru/bussines/navigation/glonass/interfeysnyy-kontrolnyy-dokument/> (дата обращения 01.06.2021).

измерений мощности P_i сигнала сводится к определению константы A_i^2 , это следует из соотношения (1):

$$P_i = \int_{\Omega} S_i(\omega) d\omega = \int_{\Omega} A_i^2 f_i(\omega) d\omega = A_i^2 \int_{\Omega} f_i(\omega) d\omega.$$

Для смеси навигационных сигналов различной мощности запишем

$$P_{\Sigma} = \int \sum_{i=1}^4 S_i(\omega) d\omega = \int \sum_{i=1}^4 A_i^2 f_i(\omega) d\omega \Rightarrow S_{\Sigma}(\omega) = \sum_{i=1}^4 A_i^2 f_i(\omega).$$

Форма f_i СГМ навигационных сигналов стандартной точности определяется исходя из их структуры согласно (2), однако к определению f_i возможен и другой подход. Во ВНИИФТРИ для калибровки навигационной аппаратуры потребителя широко применяют имитаторы навигационных сигналов [3]. Настройки имитаторов позволяют воспроизводить различные комбинации сигналов ГНСС. Для исследования характеристик сигналов имитатор настраивают на воспроизведение сигналов одного НКА, затем сигналы включаются по одному (остальные выключены). Таким образом, с помощью анализатора сигналов измеряют и записывают усредненную форму $S_i(\omega)$ для каждого навигационного сигнала отдельно. После сравнения результатов записи с теоретическими оценками на основании (2) для сигналов стандартной точности рассчитывают поправочные коэффициенты для амплитуд, т. е. получают оценки формы f_i для всех навигационных сигналов.

Анализатор сигналов позволяет измерить суммарную мощность P_{Σ} всех сигналов в полосе, а также получить огибающую СПМ S_{Σ} (рис. 1). С учётом сказанного выше запишем

$$S_{\Sigma}(\omega) = A_1^2 f_1(\omega) + A_2^2 f_2(\omega) + A_3^2 f_3(\omega) + A_4^2 f_4(\omega). \quad (3)$$

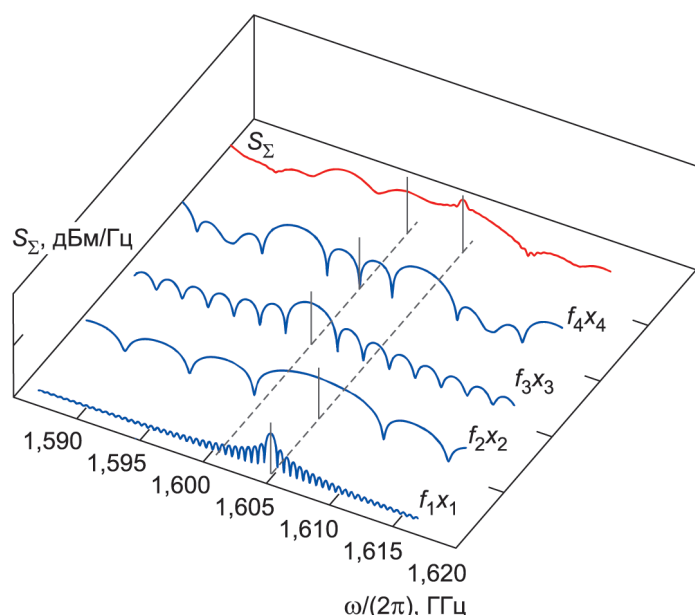


Рис. 1. Математическая модель $S_{\Sigma}(\omega)$

Fig. 1. Math model of $S_{\Sigma}(\omega)$

Для удобства обозначим набор неизвестных квадратов амплитуд как $x_j = A_j^2$.

Мощности сигналов в общем случае различны, набор констант x_i неизвестен. Для нахождения четырёх неизвестных x_i необходимо составить четыре уравнения, связывающие x_i друг с другом и с измеренными P_Σ или S_Σ . Равенство (3) должно выполняться на любой частоте в пределах полосы L . При подстановке в (3) четырёх различных значений частоты ω получим требуемую для решения задачи систему. В качестве частот ω_j для подстановки в (3) выберем: несущую частоту сигнала с частотным разделением; несущую частоту сигнала с кодовым разделением; частоту первого локального минимума в спектре сигнала стандартной точности с частотным разделением; частоту первого локального минимума в спектре сигнала стандартной точности с кодовым разделением. Выбор частот обусловлен особенностями формы f_j сигналов. С точки зрения решения задачи целесообразно рассматривать (3) в точках экстремумов, а не на пологих участках. В результате подстановки частоты ω_j получим систему линейных алгебраических уравнений из четырёх строк:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 f_1(\omega_1) + x_2 f_2(\omega_1) + x_3 f_3(\omega_1) + x_4 f_4(\omega_1) = S_{\Sigma}(\omega_1); \\ \hline x_1 f_1(\omega_4) + x_2 f_2(\omega_4) + x_3 f_3(\omega_4) + x_4 f_4(\omega_4) = S_{\Sigma}(\omega_4). \end{array} \right.$$

Запишем классическую систему линейных алгебраических уравнений в матричном виде:

$$F\mathbf{X}=\mathbf{S}, \quad (4)$$

где F – квадратная матрица коэффициентов $f_i(\omega_j)$; $\mathbf{X}$ – вектор-столбец неизвестных x_j ; $\mathbf{S}$ – вектор-столбец значений огибающей СПМ S_ζ на частотах ω_j . Решение (4) находят в виде [4]:

$$\mathbf{X} = \mathbf{F}^{-1} \mathbf{S}.$$

Однако радиотехнические шумы в тракте передачи сигнала, а также ненулевая погрешность измерений СПМ анализатором сигналов приводят к искажению формы СПМ S_{Σ} , следовательно, делают задачу (4) плохо обусловленной. Найти решение такой задачи можно с применением метода регуляризации по Тихонову [5]. В этом случае необходимо решить систему вида (подобную системе линейных алгебраических уравнений (4)):

$$(F + \alpha E)\mathbf{X} = \mathbf{S},$$

где α – параметр регуляризации; E – единичная матрица того же размера, что и F .

Оценку решения найдём в виде

$$\mathbf{X}_0 = (F + \alpha E)^{-1} \mathbf{S}$$

и рассчитаем так называемую «невязку» r , которая представляет собой норму (модуль в евклидовом смысле) разности

исходного вектора правой части $\mathbf{S}$ и рассчитанного по найденному решению $\mathbf{S}_0 = \mathbf{F}\mathbf{X}_0$:

$$\mathbf{r} = \|\mathbf{F}\mathbf{X}_0 - \mathbf{S}\|.$$

При этом параметр регуляризации α уменьшают до тех пор, пока не будет найден минимум невязки $\mathbf{r}$. Следует отметить, что оценённая по Тихонову невязка показывает расхождение измеренной S_Σ и результатов расчёта только в четырех точках – на выбранных частотах ω_j . Целесообразно использовать другой критерий – минимум среднего квадратического отклонения выборки разностей функции $S_\Sigma(\omega)$ и суммы четырёх зависимостей с весовыми коэффициентами x_i в пределах полосы Π .

После нахождения x_i значения парциальных мощностей рассчитаем по формуле

$$P_i = x_i \int_{\Pi} f_i(\omega) d\omega.$$

Эксперимент. Предложенный метод измерений опробован в ходе нескольких экспериментов. Рассмотрим схему эксперимента. Генератор, воспроизводящий навигационные сигналы с частотным и кодовым разделением одновременно, соединим кабелем непосредственно с анализатором сигналов. На первом этапе измерим мощность каждого навигационного сигнала отдельно, затем все сигналы включим одновременно. С помощью анализатора сигналов измерим суммарную мощность P_Σ сигналов в полосе и общую огибающую СПМ S_Σ в диапазоне частот L1.

Произведём измерения при различных комбинациях мощностей навигационных сигналов и на разных литерных частотах (–7; –2; 6). Результаты измерений мощности с применением предложенного метода, а также полученные погрешности метода приведены в табл. 1. Пример $S_\Sigma(\omega)$ и суммы $f_i(\omega)$ с рассчитанными весовыми коэффициентами x_i показан на рис. 2. Здесь и далее в таблицах введены следующие обозначения: $P_{\text{и}}$ – результат прямых измерений мощности сигнала анализатором; $P'_{\text{и}}$ – результат оценки мощности предложенным методом; $\Delta_{\text{м}} = P_{\text{и}}/P'_{\text{и}}$ – методическая составляющая погрешности измерений.

Методическая погрешность при работе на –2 литерной частоте существенно превысила предыдущие результаты. При детальном рассмотрении спектров отдельных сигналов (см. рис. 1) установлено, что при работе на –2 литерной частоте, во-первых, достигается полное перекрытие занимаемых полос сигналов, во-вторых, локальный минимум спектра сигнала стандартной точности с частотным разделением приходится очень близко к несущей частоте сигналов с кодовым разделением. Иными словами, два уравнения системы (4) становятся практически линейно зависимыми, а значит, обусловленность системы уравнений (4) резко ухудшается, как следствие – растёт методическая погрешность. Выходом из этой ситуации является выбор опорных частот ω_j таким образом, чтобы, с одной стороны, они находились достаточно далеко друг от друга для обеспечения линейной независимости строк (4), а с другой стороны – частоты по-прежнему должны находиться в точках экстремумов f_i .

В целях дальнейших исследований метрологических характеристик разработанного метода был проведён ряд экспериментов. Далее приведены результаты трёх наиболее показательных экспериментов.

В первом эксперименте при выборе нового набора частот ω_j погрешность удалось уменьшить до 0,9 дБ (табл. 2), сигналы с частотным разделением излучаются на –2 литерной частоте. Поскольку достигнутый результат оптимистичен, можно ожидать дальнейшего уменьшения погрешности путём оптимального выбора ω_j . Этот вопрос требует более глубокого анализа и проработки.

Цель второго эксперимента – изучить работу алгоритма, если один из четырёх сигналов в полосе отсутствует (не излучается). Сигналы с частотным разделением излучаются на 3 литерной частоте, сигнал с СПМ P_4 не генерируется (см. табл. 2).

Следует отметить, что в результате решения системы (4) рассчитываются четыре неизвестные величины x_i .

Таблица 1

Мощность навигационных сигналов на различных литерных частотах

Номер сигнала	$P_{\text{и}}$, дБм	$P'_{\text{и}}$, дБм	$\Delta_{\text{м}}$, дБ
–7 литерная частота			
P_1	–43,17	–43,30	0,13
P_2	–47,60	–47,20	–0,40
P_3	–45,12	–45,10	–0,02
P_4	–40,95	–41,20	0,25
6 литерная частота			
P_1	–48,80	–48,88	0,08
P_2	–53,40	–53,45	0,05
P_3	–47,20	–47,18	–0,02
P_4	–53,70	–53,61	–0,09
–2 литерная частота			
P_1	–47,50	–47,46	–0,04
P_2	–47,65	–49,67	2,02
P_3	–47,55	–46,10	–1,45
P_4	–48,20	–48,60	0,40

S_Σ , дБм/Гц

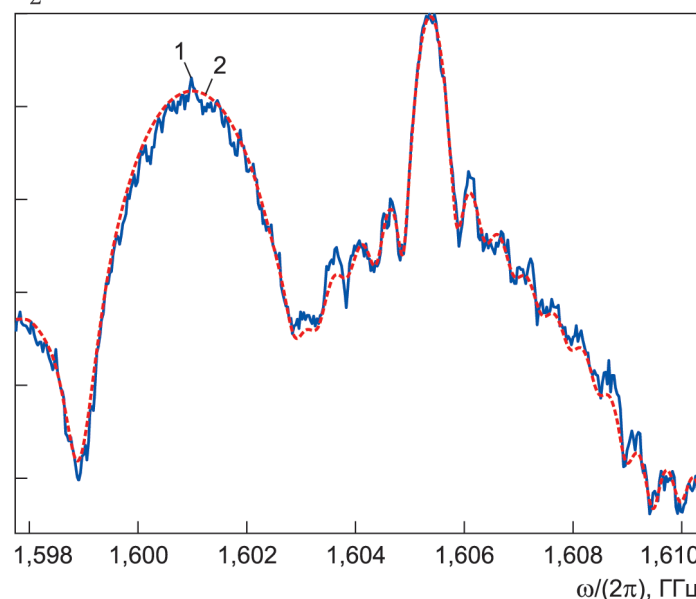


Рис. 2. Измеренная (1) и расчётная (2) суммарные спектральные плотности мощности S_Σ сигналов

Fig. 2. Measured and calculated signals total spectral power densities. Solid line – measured S_Σ , dotted line – calculation result

Таблица 2

Результаты измерений мощности навигационных сигналов в различных условиях

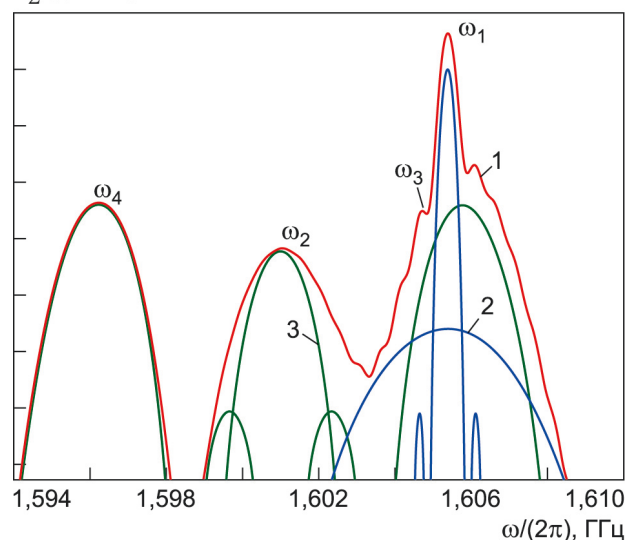
№ п/п	Условия эксперимента	СПМ	P_i , дБм	P'_i , дБм	Δ_m , дБ
1	Альтернативный выбор набора частот ω_j , сигналы с частотным разделением излучаются на –2 литерной частоте	P_1	–47,50	–46,4	0,90
		P_2	–47,65	–47,9	0,25
		P_3	–47,55	–48,2	0,65
		P_4	–48,20	–48,9	0,70
2	Сигналы с частотным разделением излучаются на 3 литерной частоте, сигнал с СПМ P_4 не генерируется	P_1	–47,50	–47,6	0,10
		P_2	–47,65	–48,1	0,45
		P_3	–47,55	–47,4	0,15
		P_4	–	–68,9	–
3	Сигналы с частотным разделением излучаются на 2 литерной частоте, сигналы с кодовым разделением отсутствуют	P_1	–35,5	–35,3	0,2
		P_2	–35,5	–35,8	0,3
		P_3	–	–62,2	–
		P_4	–	–62,2	–

Так как в результатах измерений анализатора присутствуют аддитивные шумы, то нельзя получить результат $x_i=0$ в отсутствие i -го сигнала. В итоге динамический запас метода составил не менее 20 дБ (два порядка). Это означает, что потенциально метод способен различить сигналы с разницей по мощности 0–17 дБ. Результаты наблюдений НКА показывают, что реальные отличия по мощности навигационных сигналов одного диапазона частот обычно составляют доли единицы децибел и не превосходят 0,5 и 3,5 дБ соответственно для ГЛОНАСС и GPS.

Также проведён третий эксперимент с реальным сигналом с выхода крупноапертурной антенной системы из состава МК ОЭХ-М. В настоящее время в составе орбитальной группировки ГЛОНАСС отсутствуют НКА, излучающие одновременно сигналы с кодовым и частотным разделением, однако метод должен оценивать парциальные мощности навигационных сигналов в любом сочетании, пусть даже в отсутствие сигналов с кодовым разделением. Суммарная мощность P_1+P_2 навигационных сигналов в полосе измерена с помощью анализатора сигналов. Мощность P_1 сигнала измерена согласно [6], разность суммарной мощности P_1+P_2 и мощности P_1 в силу ортогональности сигналов принята за мощность P_2 . Результаты измерений этого эксперимента приведены в табл. 2, сигналы с частотным разделением излучаются на 2 литерной частоте.

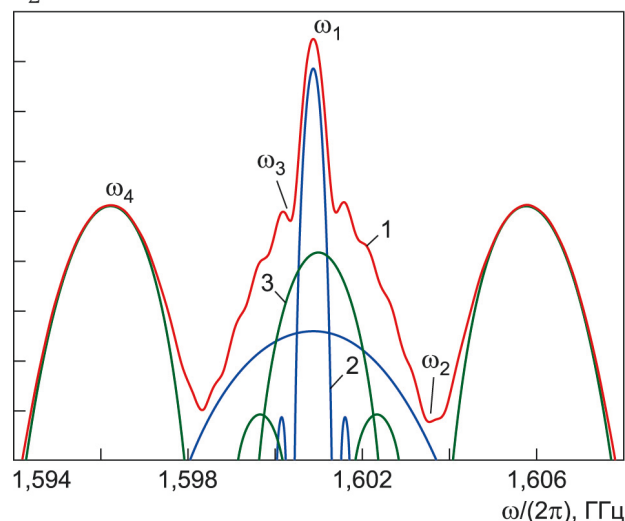
Сигналы с кодовым разделением отсутствовали. Однако алгоритм не мог не оценить их мощности, как это было показано в предыдущем эксперименте. Приведённые оценки меньше результатов измерений приблизительно на 27 дБ (почти на три порядка), при выбранном динамическом запасе 20 дБ эти значения можно считать пренебрежительно малыми (шумом измерений).

S_Σ , дБм/Гц



а

S_Σ , дБм/Гц



б

Рис. 3. Выбор опорных частот ω_1 – ω_4 метода на 6 (а) и –2 (б) литерных частотах:

1 – суммарная СПМ S_Σ сигналов; 2, 3 – формы спектров f_i сигналов соответственно с частотным и кодовым разделением

Fig. 3. Method reference frequencies selection for different channel frequencies (at the top for 6 channel, at the bottom for –2 channel). Curve 1 – total spectral power density of signals, lines 2 – signals spectra forms f_i with frequency division, lines 3 – f_i signals with code division

Анализ результатов. В настоящее время предложены несколько методов измерений парциальных мощностей навигационных сигналов [7, 8]. Большинство из них основано на корреляционной обработке или на длительном накоплении сигнала. Основные недостатки таких методов – необходимость знания структуры навигационных сигналов и трудности обработки больших выборок данных. Разработанный метод свободен от указанных недостатков. При необходимости с использованием имитатора можно получить форму спектра любого навигационного сигнала. Есть определённые сложности при вычислении абсолютных значений

мощности сигналов, но эта проблема решается калибровкой измерительного устройства. На вход измерителя при калибровке необходимо подать сумму навигационных сигналов известной и равной мощности, выполнить измерения с применением предложенного алгоритма, а разницу между измеренными значениями записать в виде калибровочных коэффициентов для каждого типа сигналов P_1-P_4 . Эту процедуру потребуется провести однократно. Вычислительные затраты на решение системы линейных алгебраических уравнений из четырёх строк выгодно отличаются от расчёта корреляционных интегралов или накопления тысяч отсчётов сигнала во временной области.

Также к достоинствам предложенного метода следует отнести сравнительную дешевизну его реализации. Во-первых, метод не требует специализированных и дорогостоящих опций измерительного оборудования или уникального программного обеспечения. Измерения $S_{\Sigma}(\omega)$ – прямое назначение анализаторов спектра, эта процедура хорошо известна и отработана. Практически все представленные на рынке анализаторы позволяют сохранять результаты измерений в электронном виде. Во-вторых, полоса измерений Π должна содержать основные лепестки спектров навигационных сигналов. Для ГЛОНАСС это 20–25 МГц. Такие полосы доступны для анализа даже с помощью бюджетных анализаторов сигналов.

В ходе экспериментов было установлено, что методическая погрешность зависит от выбора частот ω_j . При подстановке набора ω_j в уравнение (3) получается система уравнений, а также на этих частотах рассчитывается невязка по Тихонову, которая является критерием точности решения. На этапе разработки математической модели принято решение выбирать те частоты, на которых f_j имеют особенности и экстремумы (см. рис. 2). Формы $f_j(\omega)$ сильно отличаются, хотя максимумы могут совпадать (для сигналов с частотным разделением), локальные минимумы находятся на разных частотах. На оси частот можно найти такие участки, где спектральная мощность одного сигнала существенно превышает остальные – именно там предполагается располагать опорные частоты. Иными словами планируется выбирать частоты таким образом, чтобы матрица F в (4) приобретала диагональный вид или хотя бы стремилась к нему. Предложенный подход оправдал себя при работе на крайних литерах (6; –7), когда перекрытие полос сигналов стандартной точности минимально. Однако при полном перекрытии полос пришлось выбирать частоты ω_j по-другому (см. рис. 3). Если руководствоваться принятым правилом, то частоты ω_1, ω_2 практически сливаются. В дальнейшем предстоит продолжение исследования метода и разработка критериев оптимального выбора частот ω_j для всех литерных частот ГЛОНАСС, а также различных сочетаний мощностей навигационных сигналов.

К недостаткам метода следует отнести чувствительность метода к форме измеренной огибающей $S_{\Sigma}(\omega)$. Искажение $S_{\Sigma}(\omega)$, особенно на частотах ω_j , приведёт к срыву решения системы (4). В случае узкополосной помехи достаточно выбрать ω_j на «чистых» участках полосы Π . По этой

причине на результаты измерений не повлияли особенности формы спектра реального сигнала, вызванные действием заградительного фильтра в передающем тракте НКА (вырезающего полосу частот в диапазоне L1), достаточно не выбирать опорные частоты ω_j в полосе заграждения этого фильтра. Однако если антенная система одновременно принимает сигналы хотя бы двух НКА, сигналы которых сравнимы по ширине занимаемых полос и по мощности, то $S_{\Sigma}(\omega)$ в пределах полосы Π будет искажена на всех частотах. Поэтому необходимо сформулировать требования к качеству анализируемого сигнала: в рассматриваемой полосе частот Π не должно быть сигналов других НКА, широкополосных помех и нежелательных излучений НКА. Исходя из результатов эксперимента по определению динамических характеристик метода, мощность помех должна быть меньше 0,01 мощности навигационных сигналов в этой полосе. При работе в тракте это условие легко выполняется, однако добиться пространственной селекции одного НКА и вместе с этим ослабить уровень приземных помех позволяют только направленные антенные системы.

При опробовании метода в лаборатории получены результаты для уровней мощности сигналов от –54 до –40 дБм. Однако типичные уровни мощности сигналов ГНСС на выходе антенн комплекса МК ОЭХ-М находятся в пределах –40...–30 дБм (см. описание проведённых экспериментов в табл. 2), т. е. на порядок больше модельных значений. Увеличение отношения сигнал-шум при работе с измерительной аппаратурой однозначно приводит к улучшению метрологических характеристик при измерениях. Как только перспективные НКА будут выведены на орбиту и включены в состав орбитальной группировки, предложенный метод будет опробован на реальном сигнале.

Заключение. Во ВНИИФТРИ предложен и опробован метод измерений парциальных мощностей излучаемых НКА одновременно навигационных сигналов с частотным и кодовым разделением. Пределы методической погрешности измерений мощности составили от $\pm(0,1...0,25)$ дБ в условиях минимального перекрытия занимаемых сигналами полос до $\pm 0,9$ дБ при полном перекрытии.

Список литературы

1. Перов А. И., Харисов В. Н. ГЛОНАСС: принципы построения и функционирования. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
2. Ярлыков М. С. Меандровые шумоподобные сигналы (ВОС-сигналы) и их разновидности в спутниковых радионавигационных системах. М.: Радиотехника, 2017.
3. Печерица Д. С., Федотов В. Н. Калибровка имитаторов сигналов глобальных навигационных спутниковых систем // Измерительная техника. 2018. № 8. С. 60–64. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it-2018-8-60-64>
4. Письменный Д. Т. Конспект лекций по высшей математике: полный курс. 10-е изд., испр. М.: Айрис-пресс, 2011. 608 с.
5. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979.

6. Завгородний А. С., Печерица Д. С. Метод измерения мощности ортогональных составляющих сигналов ГНСС // Тез. докл. VII Международного симпозиума «Метрология времени и пространства», Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2014. С. 152–155.

7. Донченко С. И., Денисенко О. В., Харисов В. Н., Пельтин А. В., Павлов В. С., Карутин С. Н. Технология мониторинга сигналов КА ГНСС с использованием метода временного накопления // Вестник метролога. 2019. № 4. С. 4–11.

8. Власов И. Б., Гаверилов А. И., Кушнир А. А., Пельтин А. В., Семенов Д. В., Мыкольников Я. В. Оценка параметров радионавигационных сигналов, результаты ОКР «Метрология» // Тез. докл. VIII Международного симпозиума «Метрология времени и пространства», Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2016. С. 200–202.

References

1. Perov A. I., Kharisov V. N., *GLONASS: principles of construction and functioning* [GLONASS: Printsipy Postroeniya i Funktsionirovaniya], Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010, 800 p. (In Russ.)

2. Yarlykov M. S., *Meander noise-like signals (BOS signals) and their varieties in satellite radio navigation systems* [Meandrovye

shumopodobnye signaly (BOC-signaly) i ikh raznovidnosti v sputnikovykh radionavigatsionnykh sistemakh], Moscow, Radiotekhnika Publ., 2017. (In Russ.)

3. Pecheritsa D. S., Fedotov V. N., *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, no. 8, pp. 824–830.
<https://doi.org/10.1007/s11018-018-1509-z>

4. Pis'mennyj D. T., *Lecture notes in higher mathematics: full course* [Konspekt lekcij po vysshej matematike: polnyj kurs], Moscow, Ajris-press Publ., 2011, 608 p. (In Russ.)

5. Tikhonov A. N., Arsenin V. Ya., *Methods for solving ill-posed problems* [Metody resheniya nekorrektnykh zadach], Moscow, Nauka Publ., 1979. (In Russ.)

6. Zavgorodnii A. S., Pecheritsa D. S., *Metrologiya vremeni i prostranstva*, Proceedings of VII symposium, Mendeleevo, FSUE “VNIIFTRI”, 2014, pp. 152–155. (In Russ.)

7. Donchenko S. I., Denisenko O. V., Harisov V. N., Pel'tin A. V., Pavlov V. S., Karutin S. N., *Vestnik Metrologa*, 2019, no. 4, pp. 4–11. (In Russ.)

8. Vlasov I. B., Gavrilov A. I., Kushnir A. A., Pel'tin A. V., Semenov D. V., Mykol'nikov Y. V., *Metrologiya vremeni i prostranstva*, Proceedings of VIII symposium, Mendeleevo, FSUE “VNIIFTRI”, 2016, pp. 200–202. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 22.06.2021; принята к публикации 29.06.2021.