

Метод натуральных измерений профиля интенсивности излучения в зоне космического аппарата для спутникового лазерного дальномера наземного базирования

© Е. В. Бурмистров, И. А. Елантьев, С. А. Кононаева, А. О. Муркин

АО «НПК «СПП», г. Москва, Россия

Реферат

Поводом для настоящей работы послужила идея д.т.н. Васильева В. П., высказанная в частной беседе, о проведении эксперимента по локации космического аппарата в пролетном режиме: опорно-поворотное устройство неподвижно, выставлено в упреждающую точку траектории, лоцируемый объект проходит диаграмму направленности излучения в процессе сеанса лазерной дальнометрии. Система наведения, лишенная углового шума, обеспечит соответствие плотности ответов в центре диаграммы излучения энергетическому расчету. Задача решена осреднением статистики, накапливаемой в серии последовательных пролетов. Основная цель работы — реализация пролетного режима локации на серийном изделии.

Экспериментальная часть работы проводилась на станциях «Сажень-ТМ», при этом первые статистически значимые сеансы накоплены в обсерватории «Светлое». Методика формирования программы движения состояла в интерполяции угловых целеуказаний и масштабирования времени; прогноз дальности оставался без изменений. Интервал обнаружения полезного дальномерного сигнала от КА ГЛОНАСС составил 10 с, что соответствует времени 5 последовательных пролетов. Соотношение сигнал/шум при этом снизилось пропорционально доле пролетных участков от общего времени проводки (8–15 %), что не мешало уверенному детектированию сигнала в дневном режиме локации. Тут использовано обстоятельство, что на этапе проектирования системы «Сажень-ТМ» заложено соотношение сигнал/шум исходя из необходимости получения несмещенных оценок дальности, что существенно выше порогового значения сигнал/шум, требуемого для детектирования сигнала и в этом параметре есть запас.

Реализация идеи пролетного режима привела к созданию инструмента — метода натуральных измерений распределения интенсивности излучения по сечению лазерного пучка в зоне орбиты космического аппарата пропорционально темпу отраженных сигналов, регистрируемых в одноэлектронном режиме локации при прохождении космическим аппаратом зоны излучения. Искомый профиль интенсивности излучения есть результат построения плотности распределения моментов дальномерных событий по их реализации в серии центральных пролетов с приведением размерности аргумента к угловым координатам пропорционально угловой скорости космического аппарата вдоль проводки.

Ключевые слова: спутниковый лазерный дальномер, профиль интенсивности излучения, угловой шум, пролетный режим.

Контакты для связи: Бурмистров Евгений Владимирович (buewg@yandex.ru).

Для цитирования: Бурмистров Е. В., Елантьев И. А., Кононаева С. А., Муркин А. О. Метод натуральных измерений профиля интенсивности излучения в зоне космического аппарата для спутникового лазерного дальномера наземного базирования // Труды ИПА РАН. 2021. Вып. 58. С. 11–16.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.58.11-16>

Method of In-Situ Measurements of the Radiation Intensity Profile in the Spacecraft Zone for a Ground-Based Satellite Laser Ranger

E. V. Burmistrov, I. A. Elantsev, S. A. Kononova, A. O. Murkin

JSC "SPC "SPP", Moscow, Russia

Abstract

The reason for this work was the idea of D.Eng.Sc. V. P. Vasilyev, expressed in a private conversation and dealing with carrying out an experiment on locating a spacecraft in a flyby mode: the rotary support is stationary and set to the anticipated trajectory point, the target object passes the directional radiation pattern during the laser ranging session. The guidance system without angle noise will provide for correspondence of the response density at the center of the radiation pattern to the energy calculation. The problem is solved by averaging of the statistical data accumulated in a series of successive flybys. The main task of this work is to implement location flyby mode on serial product.

The experimental part of the work was carried out at the "Sazhen-TM" stations, while the first sessions which are significant for statistics were accumulated at the "Svetloe" observatory. The method of motion program forming consisted of interpolating of angular target designations and time scaling; the range forecast remained unchanged. The location

interval of the relevant range signal from the GLONASS spacecraft was 10 seconds, which corresponds to the time of 5 consecutive flybys. At the same time the signal-to-noise ratio proportionally decreased to the portion of flybys of the total tracking time (8–15 %), which did not interfere with reliable signal detection in daytime location mode. The fact used here is that at the design stage of “Sazhen-TM” system, the signal-to-noise ratio has been set based on the need to obtain unbiased range estimates, which are significantly higher than the signal-to-noise threshold required for signal detection and there is a reserve for this parameter.

The implementation of the flyby mode idea has led to the development of a tool — a method of in-situ measurements of the radiation intensity distribution over the cross section of the laser beam in the orbital zone of the spacecraft in proportion to the rate of reflected signals registered in the single-electron ranging mode when the spacecraft passes the radiation zone. The target profile of the radiation intensity is the result of the tracing of the distribution density of range measuring events moments based on their implementation in a series of central flybys with the dimension of the argument corresponding to angular coordinates in proportion to the angular velocity of the spacecraft along the tracking.

Keywords: satellite laser ranger, radiation intensity profile, angle noise, flyby mode.

Contacts: Evgeniy V. Burmistrov (buewg@yandex.ru).

For citation: Burmistrov E. V., Elantyev I. A., Kononaeva S. A., Murkin A. O. Method of in-situ measurements of the radiation intensity profile in the spacecraft zone for a ground-based satellite laser ranger // Transactions of IAA RAS. 2021. Vol. 58. C. 11–16.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.58.11-16>

Введение

Современные спутниковые лазерные дальнометры (СЛД) рассчитывают с запасом по энергетике для снижения зависимости от условий локации, совокупное влияние которых расширяет диаграмму направленности зондирующего импульса, формируемую оптической системой σ_{las} (рис. 1), за счет рассеяния и турбулентных искажений σ_{atm} , вносимых атмосферой на трассе локации, а также угловых колебаний визирной линии, вносимых ограниченной жесткостью подвеса и работой системы наведения (СН) σ_{SN} в следящем режиме:

$$\sigma^2 = \sigma_{las}^2 + \sigma_{atm}^2 + \sigma_{SN}^2. \quad (1)$$

Отраженный сигнал преодолевает атмосферу широким фронтом, возможные флуктуации интенсивности излучения, доставленного до приемной апертуры, усредняются, потери на рассеянии в безоблачной атмосфере минимальны, а поглощение подлежит фотометрированию, поэтому для



Рис. 1. Варианты одиночного прохождения КА через диаграмму зондирующего импульса

проверки соответствия информационной производительности условиям локации наиболее интересна возможность измерения плотности энергии, доставляемой до космического аппарата (КА).

Для этой цели целесообразно применение пролетного режима локации, когда спутник проходит зону лазерного излучения за счет собственного орбитального движения. Отраженный сигнал в этом случае сформирован ретрорефлекторной системой, размеры которой на 3 порядка меньше размеров пятна от зондирующего импульса в зоне КА, поэтому мощность отраженного сигнала в каждый момент времени определяется локальным значением мощности зондирующего сигнала, падающего на апертуру отражателей.

Ранее пролетный режим применялся, например, для целей астрометрии, где требовалось наблюдать трек объекта относительно слабых звезд, детектируемых в поле измерительной камеры в результате осреднения растровой информации в серии кадров. Задача построения профиля интенсивности излучения в зоне КА путем осреднения моментов дальномерных импульсов возникла недавно в связи с необходимостью подтверждения энергетического потенциала квантово-оптической системы «Сажень-ТМ» с учетом неопределенности параметров углового шума системы наведения и рассеяния лазерного излучения в атмосфере.

Основная часть

Фактическое распределение энергии по пятну на высоте орбиты КА пропорционально среднему темпу отраженных сигналов, регистрируемых в одноэлектронном режиме (Васильев и др., 2007) за время прохождения КА через диаграмму излучения, при этом наилучшее приближение дает центральный пролет (рис. 1), остальные показывают заниженную σ . Основным ограничивающим фак-

тором, не позволяющим в настоящее время даже для экспериментальных лазерных локоаторов с частотой повторения импульсов 1 МГц (Wang, et al., 2021) получить за один пролет хорошее приближение формы диаграммы излучения, является информационная производительность, а речь идет об обеспечении доступности этой технологии для большинства серийно эксплуатируемых СЛД, в том числе для решения задачи измерения формы двумерной диаграммы.

Например, в лазерном дальнометре «Сажень-ТМ» с частотой повторения излучаемых импульсов $F_{RT} = 300$ Гц, использованном для проведения эксперимента, расходимость сформированного пучка, измеренная в стендовых условиях отображением его углового поля на матричный фотоприемник, составила $\sigma_{las} = 5''$. При этом длительность t_{Diag} центрального пролета в зоне ширины диаграммы излучения на полувысоте максимальной амплитуды (WHM) для КА навигационного класса на углах места $40-70^\circ$ варьируется в пределах 0.12–0.2 сек, в том числе в зависимости от условий локации. За это время излучается не более $N = F_{RT} \cdot t_{Diag} = 300 \cdot 0.2 = 60$ импульсов. Таким образом, в одноэлектронном режиме локации за один пролет может быть зарегистрировано не более $0.1 \cdot N = 6$ ответных сигналов, что для построения формы диаграммы излучения явно недостаточно. Очевидно, нужно обеспечить накопление 1000–2000 измерений и их синхронизацию с целью корреляционной обработки приведенного к единой шкале массива.

Суть метода «натурных измерений профиля интенсивности излучения» заключается в обеспечении условий многократного прохождения КА в центральной зоне диаграммы, детектирования полезного сигнала в серии импульсов адаптивным алгоритмом обнаружения (Бурмистров и др., 2008), привязки моментов детектированных событий ко времени относительно периодических моментов, синфазных моментам ожидания пролета, и восстановления формы диаграммы направленности в зоне КА в режиме постобработки цифровой фильтрацией регистрируемых данных.

Примечательно, что пролет КА по неподвижной диаграмме излучения идентичен «пролету» диаграммы излучения по КА с его удвоенной скоростью. В обоих случаях модуль относительной угловой скорости одинаков. В этом заключается возможность решения задачи измерения углового шума СН, во всяком случае, разницы шума слежения и шума покоя:

$$\sigma_{SN} = \sqrt{\sigma^2 - (\sigma_{las}^2 + \sigma_{atm}^2)}. \quad (2)$$

При этом многократное прохождение КА в центральной зоне диаграммы излучения происходит с чередованием пролетного и следящего режи-

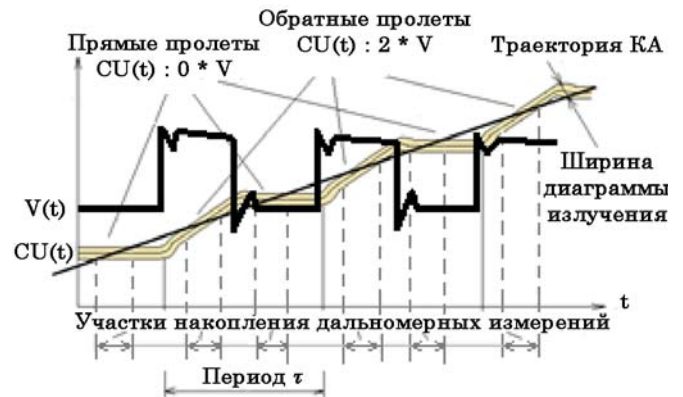


Рис. 2. Циклограмма режимов измерения профиля интенсивности излучения

мов наведения, соответствующих прямому и обратному пролетам (рис. 2).

Пролетный режим. Параметр $\sigma_{las,atm}$ измеряется в процессе локации КА во время его пролета со скоростью V через диаграмму излучения, наведенную в упреждающую точку траектории, — прямой пролет (рис. 2).

Следящий режим. Параметр σ измеряется в процессе локации КА во время его опережения диаграммой излучения с его удвоенной скоростью, СН при этом вносит угловой шум, а относительная скорость пролета V такая же, как в случае неподвижной СН, — обратный пролет (рис. 2).

Особенности реализации метода натурных измерений профиля интенсивности излучения

1. Целеуказания (ЦУ) корректируются таким образом, чтобы СН обеспечила многократное чередование прямых и обратных пролетов (рис. 2), при этом ЦУ на дальность остаются без изменений.

2. В зависимости от эффективной поверхности рассеивания (ЭПР) ретрорефлекторов и условий локации, требуется до 200 прямых и 200 обратных пролетов КА в центральной зоне измеряемой диаграммы направленности. Более сложные условия локации (переменная облачность), приемлемые для получения дальномерных измерений, в данном случае неоправданно усложняют обработку информации.

Слежение за максимумом сигнала решается экстремальным регулированием в направлении, ортогональном траектории КА в картинной плоскости. Это требует «фильтрации» до 50 % измерений, накопленных «на хордах», а равномерность заполнения полезными измерениями рабочего участка траектории является критерием достоверности эксперимента. В перспективе этих потерь можно избежать: все детектированные измерения в совокупности с измеренной фактической траекторией следящего привода позволят получить двумерное распределение интенсивности излучения.

3. Точность ЦУ, а в большей степени точность системы координат, хранящейся угловыми датчиками с калибруемым полем поправок, и ограниченность ускорений СН вынуждают расширять период τ (рис. 2 — интервал одного «обратного-прямого» пролета) существенно больше T — суммарного времени двух участков накопления измерений на обратном и прямом пролетах, определяемых уровнем интенсивности излучения не ниже половины от максимума. Отношение этих величин определяет процент полезного времени (ПВР) накопления измерений:

$$\text{ПВР} = T / \tau. \quad (3)$$

Все остальное время в стробе дальности регистрируется только фоновый шум и детектирование сигнального участка происходит с учетом ухудшения отношения сигнал/шум пропорционально ПВР. В эксперименте по КА «ГЛОНАСС» на системе «Сажень-ТМ» ПВР составил $(2 \cdot 0.173c) / 4c \approx 8.5\%$. Устойчивое обнаружение отраженных сигналов происходило в блочном режиме обработкой статистики на интервале $5 \cdot \tau$ при накоплении 2–6 точек за пролет и уровне фона на детекторе до 400 КГц.

Дополнительная фильтрация после детектирования состоит в исключении событий, попавших в строб дальности и детектированных, но на временной оси находящихся за пределами участков накопления дальномерных измерений (рис. 2). ПВР это не улучшает, но отношение сигнал/шум при этом повышается почти до уровня работы СЛД в обычном режиме, когда СН отслеживает видимое положение КА приемным каналом. 20–30 % полезного сигнала в обычном режиме, «съедаемого» экстремальным регулятором, примерно соответствует потерям полезного сигнала в пролетном режиме на краях диаграммы.

4. Для обеспечения достоверности оценок необходимо уравнивать условия регистрации полезного сигнала в пролетном и следящем режимах. Основное различие состоит в отличающихся углах между визирной линией приемной оптики и направлением падения отраженного сигнала, что может приводить к его перекрытию приемной диафрагмой, искажая измеряемую форму диаграммы излучения. Величины этих углов определены в предположении, что абберация скорости света, применительно к сферическим и уголковым ретрорефлекторам, безусловно существует и меняет направление распространения максимума отраженного сигнала в сторону тангенциальной скорости, но угол падения отраженного сигнала для наблюдателя на Земле не смещает, по крайней мере больше, чем на отношение размеров ретрорефлектора к расстоянию до него.

В пролетном режиме неподвижная СН обеспечивает минимальное смещение визирной линии приемной оптики относительно направления из-

лученного импульса за счет вращения Земли, что за время распространения сигнала не превышает 2 угл. сек.

В следящем режиме над скоростью вращения Земли превалирует скорость привода, равная удвоенной угловой скорости объекта, ее влияние достигает 10 угл. сек.

Соответствующие меры — увеличение размера приемной полевой диафрагмы, увеличение полосы спектрального фильтра в приемном канале — повышают уровень фонового шума на детекторе более чем вдвое (до 800 КГц – 1 МГц). В отличие от предыдущих пунктов этот шум добавляет к сигнальному участку ложные события, не отделяемые от полезного отраженного сигнала, их моменты распределены равномерно и являются «подставкой» под реальной формой распределения. Оценим ее величину применительно к КОС «Сажень-ТМ». Из 60 импульсов, излучаемых за активный участок пролета (см. выше) в среднем регистрируется 3.5 «ответов». На длительности сигнального участка порядка 1 нс регистрируется в среднем $60 \cdot 1 \text{ нс} \cdot 1 \text{ МГц} = 0.06$ импульсов фона. Мертвое время измерителя временных интервалов порядка 100 нс при уровне фона 1 МГц обеспечивает 10 % потерь полезного сигнала. Итоговая величина сигнал/шум $90\% \cdot 3.5 / 0.06 = 52.5$ вполне приемлема, и все же расширение диафрагмы — удобное для первых экспериментов, но не совсем серийное решение.

В серии последующих экспериментов использована возможность радиального смещения диаграммы передатчика относительно визирной линии приемника в направлении тангенциальной скорости лоцируемого объекта на половину величины абберации. Это обеспечивает диаметрально противоположное расположение отраженных сигналов в пролетном и следящем режимах в пределах штатной диаграммы без необходимости доработки приемного канала серийного изделия.

5. Для целей эксперимента непосредственно измеренные дальности не важны — важны моменты измерений и им соответствующие моменты начала периодов τ (рис. 2). Их разности позволяют определять плотность детектируемых событий как функцию времени, а их абсолютные значения позволяют осуществлять корреляционную обработку на интервале эксперимента.

Этапы цифровой фильтрации регистрируемых данных на примере измерений, полученных по КА ГЛОНАСС

Для эксперимента был выбран КА ГЛОНАСС, как аппарат с «удобной» скоростью ω (порядка 30"/сек). Статистика набрана на серийной КОС «Сажень-ТМ» в радиоастрономической обсерватории «Светлое». Представленная графическая информация соответствует реальным измерениям

одного из сеансов. Условия наблюдения на момент эксперимента (8 апреля 2021, 23:00–00:00): давление 748 мм рт. ст., температура -2°C , влажность 75 %.

Скорректированные ЦУ позволили провести сеанс и получить измерения (рис. 3) в режиме экстремального регулирования в направлении, ортогональном траектории КА, обеспечивая пролет КА через центр диаграммы $\pm 1\text{--}3''$.

Цифровая обработка полученных данных состоит в следующем:

1. Фильтрация сеанса как обычного сеанса измерения дальности, т. е. локализация сигнального участка в стробе дальности, гауссовская фильтрация.

2. Фильтрация согласно п. 3 особенностей реализации метода натуральных измерений профиля интенсивности излучения.

3. Фильтрация (отсев) измерений, полученных на хордах, удаленных от центральной линии (углового тренда) более $\pm 1''$ (рис. 3, пример на 600 секунде от начала проводки).

4. До этого момента фильтрация касалась измерений дальности. Дрейф, наблюдаемый на графике (рис. 3) — это меняющаяся разница между измерениями дальности и прогнозом дальности, т. е. уход спутника относительно прогноза дальности за время эксперимента. Дальнейшая обработка касается только моментов измеренных дальностей, для чего каждому такому моменту ставится в соответствие пролетное время — разница момента измерения и момента синхронизации, т. е. момента начала периода (рис. 2), на котором оно накоплено.

5. Каждый период согласно циклограмме режимов (рис. 2) состоит из прямого и обратного пролетов, которые при правильной работе во времени не пересекаются, кроме того, соответствующие измерения копятся на участках постоянной скорости привода. Разделение прямых и обратных про-

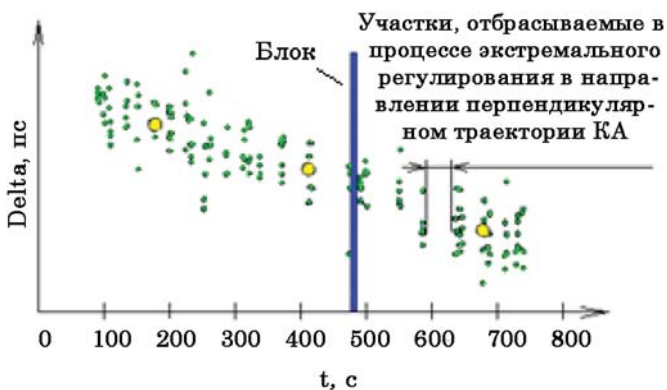


Рис. 3. Измерения по ГЛОНАСС (маленькие точки) и построенные по ним нормальные точки (большие точки)

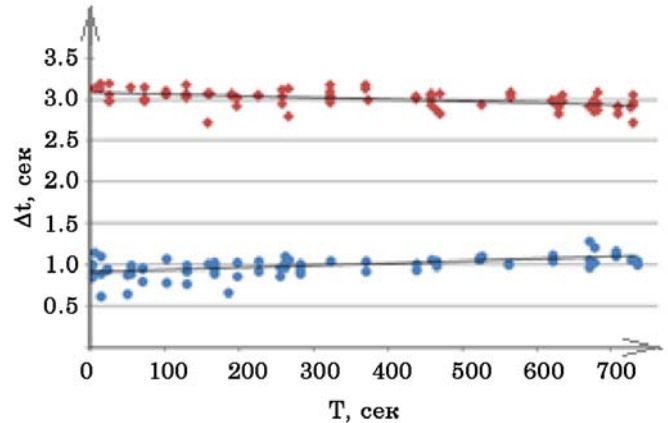


Рис. 4. Пролетное время на примере КА ГЛОНАСС (верхняя дорожка — пролетный режим, нижняя — следящий)

летов в этом случае примитивно — по полпериода $0.5 \cdot \tau$ (рис. 4). Ось абсцисс — все то же время от начала проводки, ось ординат — пролетное время. Дрейф пролетного времени, наблюдаемый на графике (рис. 4) — это результат углового дрейфа КА вдоль траектории относительно углового прогноза движения.

6. Вычисление независимых трендов пролетного времени (для пролетного и следящего режимов) на интервале накопления данных (рис. 4). Ничего удивительного, что в первом приближении эти тренды симметричны относительно центральной линии — так составлена программа ЦУ — чередуются прямые и обратные пролеты. Скорость их сближения (расхождения) определяется скоростью углового дрейфа КА относительно ЦУ вдоль траектории за время накопления всего сеанса.

Важно отметить, что во втором приближении эти тренды также симметричны. Измерения дальности привязаны к моменту старта, поэтому в пролетном режиме момент измерения опережает момент отражения на время однонаправленного распространения импульса от точки локации до цели. В следящем режиме наоборот — от КА отражается импульс, момент излучения которого задержан на время однонаправленного распространения относительно момента физического нахождения КА на визирной линии. За это время луч лазера, перемещающийся с удвоенной скоростью КА, обеспечивает требуемое опережение точки прицеливания.

7. Наложение измерений пролетного/следящего режимов отображением относительно $0.5 \cdot \tau$, построение общего тренда движения КА, выравнивание измерений относительно общего тренда (рис. 5). Каждой точке соответствует исходная точка на рис. 4.

8. Гауссовская фильтрация пролетных времен за сеанс относительно собственного тренда.

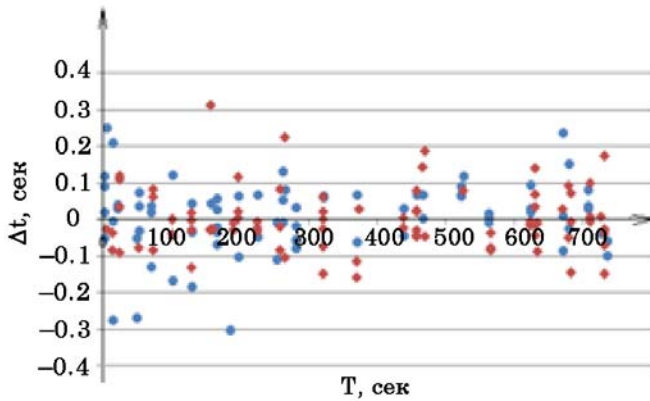


Рис. 5. Реализация пролетных времен по всем измерениям сеанса

9. Приведение единицы измерения пролетного времени (секунды) к угловым единицам диаграммы a согласно ур. 4, где ω — угловая скорость КА — для рассматриваемого спутника составила порядка 34 "/сек на рабочем участке:

$$a_i ["] = \Delta t_i [\text{сек}] \cdot \omega ["/\text{сек}]. \quad (4)$$

10. Построение плотности распределения по текущей реализации величин a_i , т. е. профиля интенсивности излучения в зоне КА (рис. 6).

По форме диаграммы найдена величина σ как ширина диаграммы на полувысоте (порядка 6").

11. Вычисление углового шума СН σ_{SN} путем независимой обработки дорожек (рис. 4) и подстановки результатов в ур. 2.

12. Вычисление параметра σ_{atm} подстановкой σ_{las} в ур. 1.

В результате эксперимента в обсерватории «Светлое» получены следующие данные: $\sigma_{SN} = 2.6''$, $\sigma_{atm} = 2''$.

Заключение

На момент публикации материала накоплены и обработаны десятки пролетных сеансов на серийных изделиях «Сажень-ТМ» (Светлое — 5, Анадырь — 2, Сарапул — 20, Зеленчукская — 3, Бразилия — 3, ЮАР — 7). Программно-математическое обеспечение доведено до состояния опытной эксплуатации.

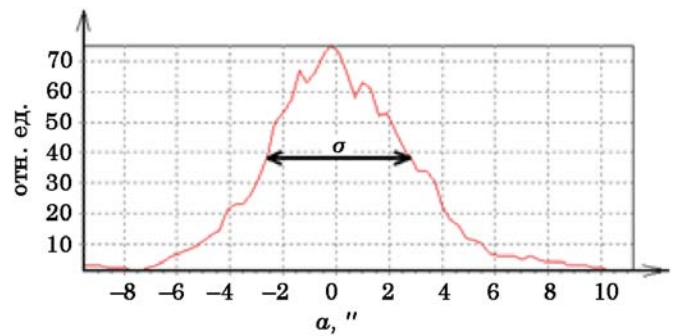


Рис. 6. Вид диаграммы на примере КА ГЛОНАСС (ось абсцисс — угол относительно центра диаграммы, угл. сек, ось ординат — плотность интенсивности излучения в относительных единицах)

В результате подстановок измеренных профилей интенсивности излучения в энергетический расчет оценено соответствие плотности регистрируемых ответов в центре диаграммы излучения энергетическому расчету. По большинству сеансов величина отклонения не превысила 20 % (Васильев и др., 2021).

Благодарность

Авторы выражают благодарность Васильеву В. П. за постановку задачи и силу его уверенности в положительном результате.

Литература

- Бурмистров Е. В. Методика и алгоритм обнаружения слабых оптических сигналов в дневных условиях при лазерной дальнометрии с высокой частотой повторения импульсов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2008. Т. 13. № 4. С. 34–43.
- Васильев В. П. О технических перспективах спутниковой лазерной дальнометрии: техническая записка // 1-е изд. М.: АО «НПК «СПП», 2021.
- Васильев В. П., Шаргородский В. Д. Прецизионная спутниковая лазерная дальнометрия на основе лазеров с высокой частотой повторения импульсов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2007. Т. 12. № 7. С. 6–10.
- Wang P., Steindorfer M. A., Koidl F., et al. Megahertz repetition rate satellite laser ranging demonstration at Graz observatory // Optics Letters. 2021. Iss. 5. P. 937–940.