

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.30>

УДК: 621.396.969.11

МНОГОКАНАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ КОММУНИКАЦИОННОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

С.П. Панько, В.В. Сухотин, О.И. Сизых, И.Ю. Тихоненко, А.В. Хныкин

**Сибирский федеральный университет
660041, Красноярский край, г. Красноярск, пр. Свободный, 79**

Статья поступила в редакцию 2 апреля 2025 г.

Аннотация. Одним из важнейших навигационных параметров, определяющих местоположение космического аппарата (КА) на орбите, является его дальность, что актуально, в первую очередь, для наведения антенных систем Земных станций (ЗС) на КА. Исследователи разных стран занимаются задачей высокоточного измерения дальности КА, однако не получили подробного рассмотрения процессы, происходящие при цифровом несинхронизированном многократном измерении длительности интервалов времени одного и того же источника, а также к настоящему времени должного внимания исследователей не получило участие групповых источников в оценке дальности КА. В статье рассмотрен метод многоканального измерения дальности КА, позволяющий повысить точность за счет исключения влияющих факторов при усреднении ансамбля измерений. Повышение возможно, если при усреднении ансамбля дальностей учитывается эллиптичность Земли, поскольку до ввода в рабочее состояние системы спутниковой телекоммуникации позиция каждой ЗС известна и в процессе предстартовой подготовки КА это позволяет накопить в памяти наземного комплекса управления (НКУ) расчетные значения поправок и подвергнуть усреднению скорректированные значения и периодического

дрейфа КА. Используя фазовый метод измерения дальности показано, что в любых позициях спутника независимо от мгновенного значения скорости его движения в двух смежных измерительных интервалах переменная составляющая набега фазы – приблизительно линейная величина. Это обстоятельство позволяет исключить переменную составляющую. Кроме того, важна внутрисистемная синхронизация, которая обеспечивается специальным уникальным дальномерным сигналом, который излучается с определенным тактом с НКУ в сторону КА. Показан учет влияния ослабления сигнала на точность измерения. Приведены структурные схемы и дано описание реализации многоканального метода измерения дальности коммуникационного космического аппарата. Рассмотренный метод усреднения результатов групповых измерений дальности КА в составе системы спутниковой телекоммуникации с учетом необходимой коррекции индивидуальных результатов обеспечивает повышение точности измерения дальности КА пропорционально количеству ЗС в составе системы.

Ключевые слова: измерение дальности, система спутниковой телекоммуникации, орбита космического аппарата, эллиптичность Земли, погрешность измерения.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (номер FSRZ-2023-0008).

Автор для переписки: Хныкин Антон Владимирович, antonkhnykin@yandex.ru

Введение

Современные спутниковые телекоммуникации обеспечивают информационное взаимодействие между пользователями, расположенными в достаточно произвольных географически позициях на поверхности Земли или в околоземном пространстве, а также в интересах подвижных терминалов в транспортных технологиях. Измерение дальности перемещающихся средств, включая космический аппарат (КА), основанное на оценке запаздывания принимаемого специального дальномерного сигнала относительно излученного [1], относится к классу задач практических приложений информационных систем. Наиболее широко используются методы дальнометрии на основе цифровых методов измерения длительности интервала времени прохождения сигналом трассы НКУ (наземный комплекс управления) – КА и обратно.

Дальность КА является одним из важнейших навигационных параметров, определяющих местоположение КА на орбите, что актуально, в первую очередь, с позиций наведения антенных систем Земных станций (ЗС) на КА, а также адаптивного повышения эффективности вероятностно-энергетических характеристик информационных систем. Обеспечение высокой скорости передачи информации и минимальной вероятности ошибки приема достигается при высокоточном знании текущих координат КА.

Космические технологии существуют достаточно длительный период времени, что говорит о большом количестве предложенных, опубликованных и апробированных технических решений, обеспечивающих высокую эффективность работы системы телекоммуникаций. Исследователи разных стран занимаются задачей точного измерения дальности КА. Одно- и многократное преобразование типа «длительность одного интервала времени – цифровой код», т.е. синхронизированное преобразование [2], рассматривается, как одно из основных. Вместе с тем, отсутствует детальный анализ процессов, происходящих при цифровом несинхронизированном многократном измерении длительности интервалов времени одного и того же источника. Оценка влияния

шума, неизбежно присутствующего в составе принимаемого сигнала, является основным направлением исследования.

1. Оценка дальности КА для группы источников

Измерение дальности КА производится в НКУ на основе оценки задержки по времени дальномерного сигнала, прошедшего по трассе НКУ – КА. При цифровом измерении дальности НКУ – КА [4] среднеквадратическое значение погрешности измерения зависит от соотношения сигнал/шум. Исчерпанным в настоящее время считается повышение точности измерения дальности за счет энергетики радиолинии.

Один из способов, направленных на повышение точности измерения дальности КА, предложен в [3]. Он включает ретранслятор на борту КА, а также базовую станцию и две ЗС на поверхности Земли. Этот способ обладает двумя важными недостатками:

- ЗС должны располагаться в позициях с одинаковой широтой, когда обеспечивается равенство исходных дальностей КА;
- реализация телекоммуникационных функций не предусматривается.

К настоящему времени, должного внимания исследователей не получило использование группы источников при оценке дальности КА.

Описываемая в настоящей работе система спутниковой связи содержит ретранслятор на борту КА и группу независимо работающих абонентов – пользовательских ЗС, на одну из которых наряду с телекоммуникационными возлагаются функции НКУ. В пределах области земной поверхности радиолуча КА размещаются ЗС в достаточно произвольных позициях с известными координатами [7]. Непосредственное выполнение операции усреднения по ансамблю результатов измерений дальности всех ЗС группы невозможно по двум причинам.

К значительному разбросу искомых дальностей, получаемых на каждой ЗС, приводит произвольное размещение ЗС в пределах значительной территории – первая причина. Усреднение ансамбля дальностей приведет к

получению некоторого среднего значения дальности, которое будет смещенным относительно истинного.

Один из возможных вариантов размещения ЗС1 и ЗС2 показан на рис. 1 [8], где приведено условное сечение земного шара плоскостью, перпендикулярной плоскости экватора.

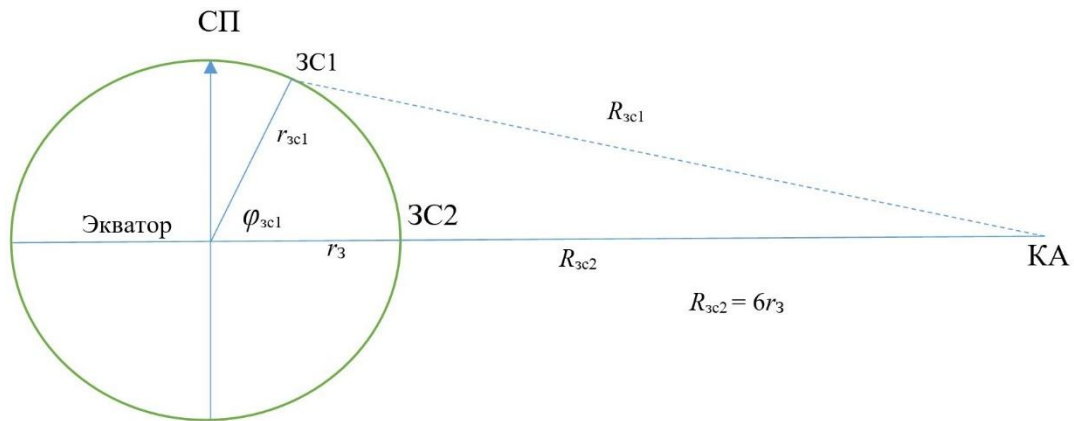


Рис. 1. Расстояние между позицией КА и точкам размещения ЗС1 и ЗС2 на поверхности Земли (дальность КА): СП – северный полюс, ЗС1 и ЗС2 – Земная станция 1 и 2 соответственно, $\varphi_{ЗС1}$ примерно 85° (предельно «высокое» для геостационарного КА) – значение широты размещения ЗС1, $R_{ЗС1}$ – дальность КА относительно ЗС1, $R_{ЗС2}$ – дальность КА относительно ЗС2, $r_{ЗС1}$ – радиус Земли с учетом эллиптичности, $r_З$ – радиус Земли на экваторе

Для высокоточного измерения дальности требуется учитывать эллиптичность Земли, поскольку радиусы Земли $r_{ЗС1}$ и $r_З$ различны.

С учетом отличия сечения поверхности кривизны Земли от идеальной окружности разность дальностей КА, измеренных на ЗС1 и ЗС2 по рис. 1, рассчитывается по формуле [8]:

$$\begin{aligned} \Delta R(\varphi_{ЗС1}) &= R_{ЗС1}(\varphi_{ЗС1}) - R_{ЗС2} = \\ &= \sqrt{(R_{ЗС2} + r_З)^2 + r_{ЗС1}^2(\varphi_{ЗС1}) - 2 \cdot (R_{ЗС2} + r_З) \cdot r_{ЗС1}(\varphi_{ЗС1}) \cdot \cos(\varphi_{ЗС1})} - R_{ЗС2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Результат расчета $\Delta R(\varphi_{ЗС1})$ (1) приведен на рис. 2:

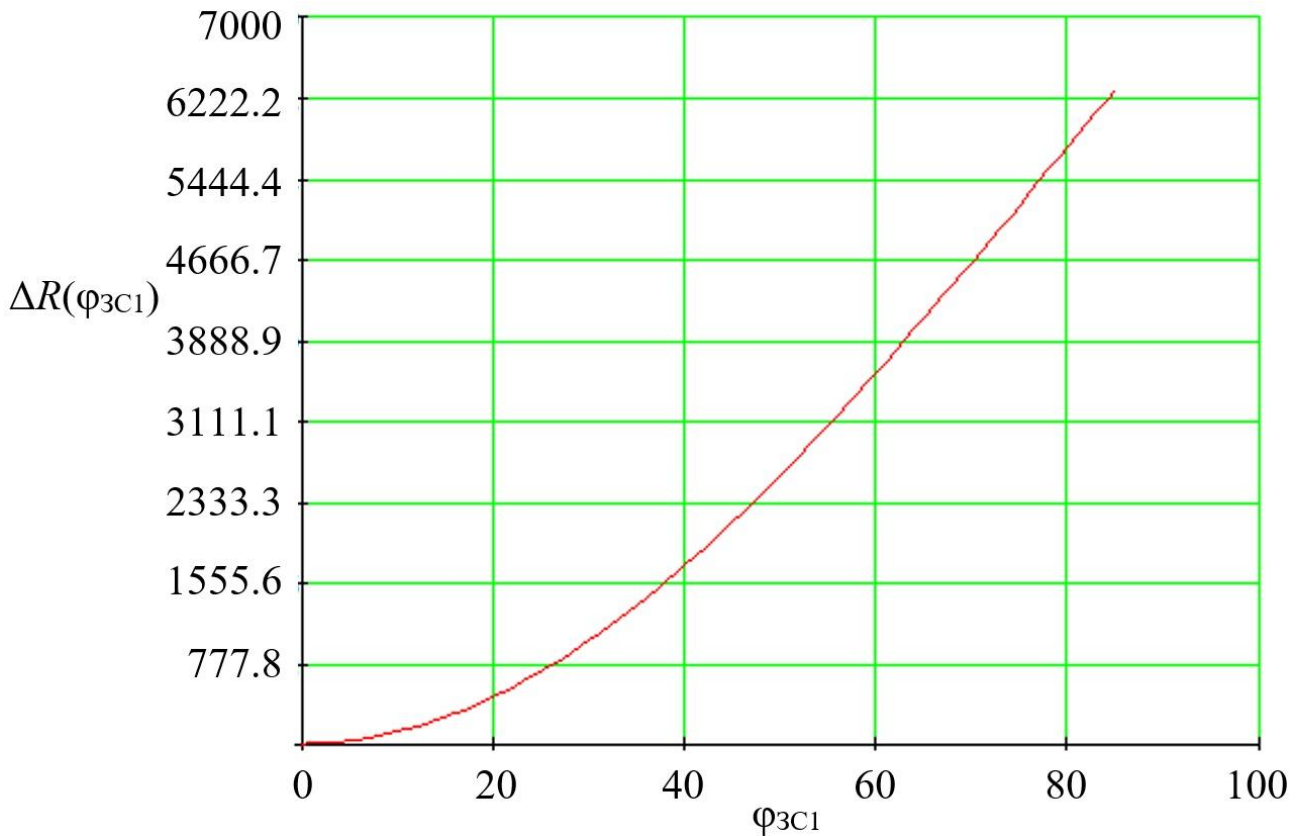


Рис. 2. Зависимость ΔR (км) от $\phi_{ЗС1}$ (градусы), по оси ординат км.

Учет расхождения долготы ЗС1 и ЗС2 только увеличивает приведенные показания. Как видно, разность дальностей существенно зависит от позиции ЗС, что подтверждает невозможность использования усреднения по ансамблю результатов, полученных для всех ЗС, для высокоточных измерений. Однако, поскольку до ввода в рабочее состояние системы спутниковой связи позиция каждой ЗС известна, то в процессе предстартовой подготовки КА это позволяет накопить в памяти НКУ расчетные значения ΔR_i (1) и произвести усреднение скорректированных значений [8]:

$$R_{\text{CP}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_i - \Delta R_i). \quad (2)$$

В общем виде дальность между КА и каждой ЗС_{*i*} равна $R_i + z_i$. Здесь $i \in (1...N)$, где N – количество ЗС в системе, z_i – случайная (шумовая) составляющая для ЗС_{*i*} с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_i^2 . Аппаратура всех ЗС в системе достаточно единообразна, поэтому можно считать случайную (шумовую) составляющую результата $z_i \approx z_0$ в

среднеквадратическом смысле. Технологией измерения дальности присущи погрешности измерения, а именно погрешность дискретизации, погрешность, вызванная шумовой составляющей принимаемого сигнала, аппаратные температурозависимые задержки, атмосферный участок (пролегает приблизительно на высоте не более 1000 км, именно он оказывает наибольшее влияние на изменение параметров сигнала) и др. Таким образом, с учетом (2) имеем:

$$D(R_{\text{CP}}) = \frac{1}{N} \sigma_i^2. \quad (3)$$

Из выражения (3) видно, что дисперсия измерений уменьшается в N раз, если учитывать оценки дальности КА до всех ЗС.

Внутрисистемная синхронизация обеспечивается специальным уникальным дальномерным сигналом, который излучается с определенным тактом с НКУ в направлении КА. Принятый на КА дальномерный сигнал переизлучается с КА на другой несущей частоте (единой для всех ЗС) в направлении Земли, где принимается всеми ЗС, включая НКУ. С целью оценки искомого расстояния необходимо принятый на ЗС дальномерный сигнал вернуть на НКУ. Одним из возможных вариантов организации возврата принятого на каждой ЗС дальномерного сигнала является частотное разделение возвращаемых сигналов N несущих частот. Поэтому радиотракт бортового ретранслятора должен осуществлять практически одновременные прием-передачу дальномерных сигналов от всех ЗС. Время задержки дальномерного сигнала при прохождении трассы НКУ – ЗС и обратно без учета задержки в приеме-передающем радиооборудовании ретранслятора равно $\Delta t_i = 4R_i/c$, причем $\Delta t_0 = 2R_0/c$. Отметим, что организация радиолинии «вверх» дальномерного сигнала от всех ЗС на основе временного разделения сигналов включает различные участки трассы, что увеличивает погрешность измерения R_0 .

Второй причиной, сдерживающей непосредственное использование процедуры усреднения, является периодический дрейф КА на геостационарной

орбите [5], вызванный влиянием Луны и Солнца, а также отличием формы Земли от идеального шара. Реальная орбита КА отличается от круговой, поскольку имеет ненулевой эксцентриситет e (эксцентриситет эллипса) и наклонение i . Расстояние от центра Земли до спутника с учетом эксцентриситета e равно:

$$R_{КА} = \frac{a \cdot (1 - e^2)}{1 + e \cdot \cos(\theta)}, \quad (4)$$

где a – большая полуось (расстояние от центра Земли до спутника при строго геостационарной орбите), $a = 42161.628$ км, θ – угловая координата радиуса-вектора (истинная аномалия). Эксцентриситет орбиты Земли не постоянен и изменяется в пределах $e = 0,017 \dots 0.9$. Эксцентриситет орбиты приводит к тому, что спутник удаляется и/или приближается относительно поверхности Земли, т.е. изменяется искомое расстояние в течение времени измерения $T_{изм}$. Отсюда следует, что R_i содержит погрешность, связанную с дрейфом КА. Как показывают расчеты [9] дрейф может достигать десятки километров.

Однако эту погрешность можно исключить, применяя фазовый метод [10] измерения дальности, фазовая компонента принимаемого сигнала содержит как постоянную измеряемую разность начальных фаз ϕ_x , так и медленно меняющуюся переменную составляющую ϕ_n ($\Delta\Psi$), вызванную перемещением спутника за время измерения. В общем виде фаза Ψ принимаемого сигнала зависит от времени t :

$$\Psi(t) = \phi_x \pm Vt, \quad (5)$$

где V – скорость изменения переменной составляющей.

Переменная составляющая существенно искажает результат измерения искомой величины ϕ_x и снижает точность измерения разности начальных фаз. Однако расчеты показывают (табл. 1), что в любых позициях спутника независимо от мгновенного значения скорости его движения в двух смежных измерительных интервалах при времени измерения порядка $T_{изм} \approx (1 \dots 10)$ с, переменная составляющая, выраженная в градусах набега фазы, не превышает

значений $(0,01...0,001)^\circ$, что позволяет приблизительно считать ее линейной величиной. Это обстоятельство позволяет исключить переменную составляющую из результата измерения, тем самым увеличить точность измерения дальности КА.

Табл. 1. Результаты расчета переменной составляющей $\Delta\Psi$.

$T_{\text{изм}},$ с	$V_{\text{min}},$ км/с	$\Delta\Psi,$ град	$\Delta\Psi_{i+1}-\Delta\Psi_i$	$V_{\text{max}},$ км/с	$\Delta\Psi,$ град	$\Delta\Psi_{i+1}-\Delta\Psi_i$
1	3,043998	7,912569	15,8245	3,105493	8,2354818	16,4715
2	3,043998	23,7376546	15,8252	3,105493	24,7064978	16,4713
3	3,043998	39,5628449	15,8251	3,105493	41,177409	16,4709
4	3,043998	55,3879829	15,8251	3,105493	57,648524	16,4711
5	3,043998	71,2130684	15,8252	3,105493	74,1195458	16,4710
6	3,043998	87,0382064	15,8251	3,105493	90,5904046	16,4708
7	3,043998	102,863344	15,8251	3,105493	107,061420	16,4710
8	3,043998	118,688482	15,8251	3,105493	123,532436	16,4710
9	3,043998	134,513567	15,825	3,105493	140,003452	16,4710

Общеизвестно, что ослабление сигнала в свободном пространстве L_0 в первом приближении можно оценить по формуле (дБ) [11]:

$$L_0 = 20 \lg \left(\frac{4\pi}{\lambda} R_i \right), \quad (6)$$

где λ – длина волны излучаемого сигнала, м. Для примера: $\lambda = 0,3$ м ($f = 1$ ГГц), $R_i = 36000$ км. Тогда $L_0 = 183,6$ дБ.

Описываемое предложение основывается на тождественности параметров шума для всех каналов. Очевидно, что ослабление принимаемого сигнала в i -ом канале L_i зависит от широты $ЗС_i$, т.е.:

$$L_i = 20 \lg \left(\frac{4\pi}{\lambda} [R_1 + \Delta R_i] \right) = 20 \lg \left(\frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_i \right), \quad (7)$$

где R_1 – дальность КА относительно $ЗС_1$.

Поэтому мощность принимаемого сигнала на $ЗС_i$ зависит от разности широт $ЗС_i$ относительно $ЗС_1$. Это обстоятельство может явиться причиной

увеличения вероятности ошибки в канале передачи информации в силу уменьшения отношения энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума. Возможна компенсация этого явления путем установки коэффициента усиления входного тракта ZC_i , учитывающего L_i . При этом шумовая составляющая не изменяется, а отношение сигнал/шум становится соизмеримым с остальными каналами.

2. Реализация многоканального измерения дальности КА

Работа устройства иллюстрируется структурными схемами на рис. 3 и 4. Инициирование измерительной процедуры производится по команде с пульта управления «ПУ», который может являться составной частью АСУ системы спутниковой связи, либо действовать под контролем оператора. По этой команде запускается ГДЗС – генератор дальномерного зондирующего сигнала, который формирует уникальный зондирующий сигнал, излучаемый в направлении КА с помощью передатчика «Пер» и антенной системы. Коммутатор «Комм» исключает возможность перегрузки приемника «Прм» мощным сигналом передатчика. Как показано выше, этот сигнал принимается бортовым оборудованием КА и переизлучается в направлении Земли на другой несущей частоте, единой в качестве приемной для всех ЗС.

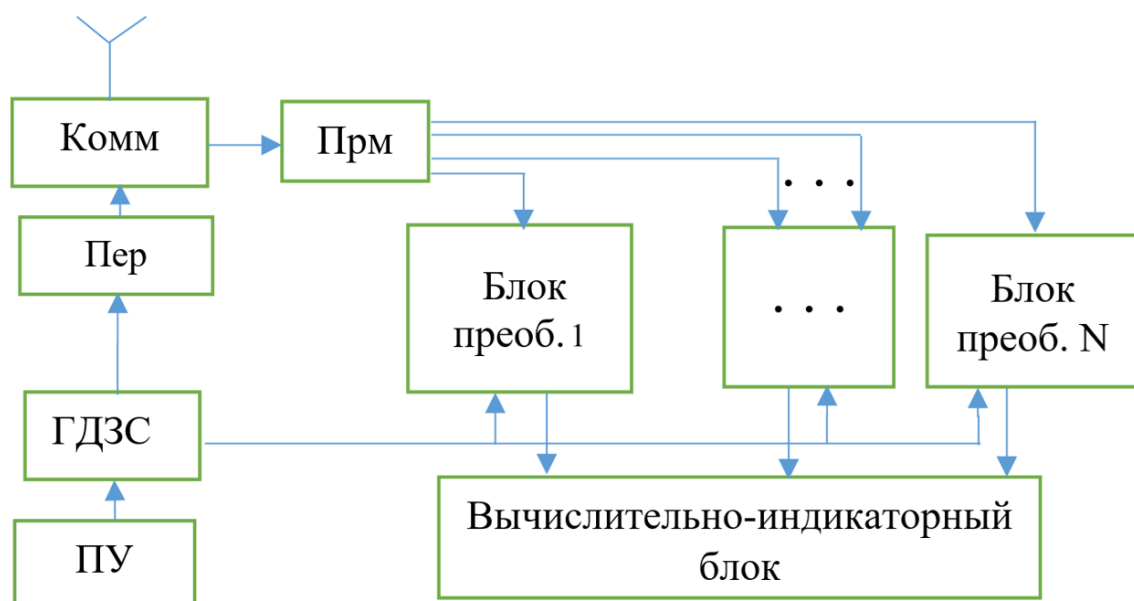


Рис. 3. Структура НКУ.

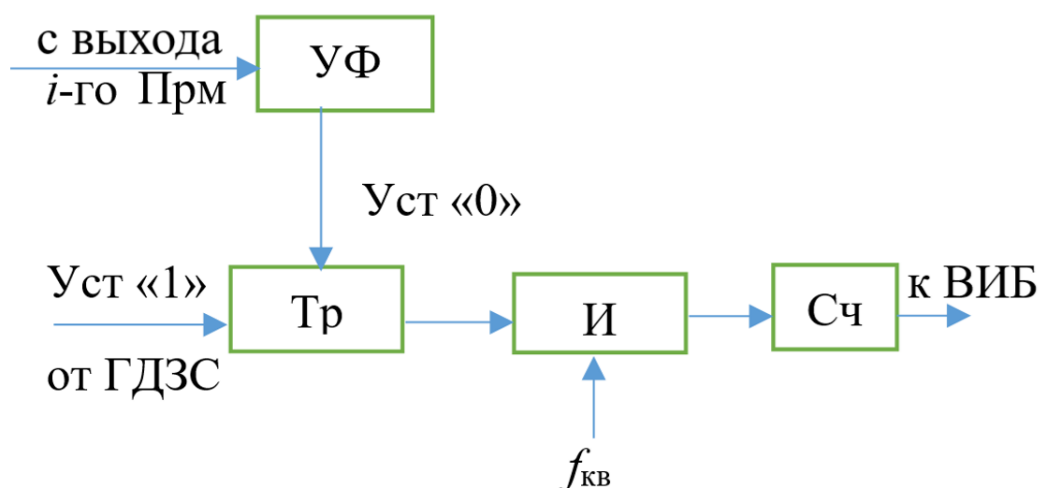


Рис. 4. Структура блока преобразователя.

На каждой ЗС принятый дальномерный зондирующий сигнал (ДЗС) переносится на индивидуальную несущую частоту и излучается в направление КА, где излучается в направление НКУ с соблюдением частотного разделения.

Приемник НКУ содержит N выходов по числу ЗС. Каждый из выходов подключен ко входу соответствующего блока преобразования (1...N) аналогового выходного сигнала в цифровой код дальности R_i [6]. Квантованию подвергается прямоугольный импульс, формируемый триггером «Тр», который устанавливается в логическое состояние «1» от ГДЗС в момент времени излучения ДЗС и возвращается в исходное состояние «0» в момент приема импульса от ЗС. УФ – узел формирования, предназначен для создания короткого импульса для установки «Тр» в состояние «0». Квантование синхронизируется импульсами, следующими с частотой $f_{кв}$. Счетчик «Сч» определяет количество импульсов квантования, совпавших с единичным состоянием «Тр».

Цифровые эквиваленты дальностей, полученных в НКУ от каждой ЗС, передаются в вычислительно-индикаторный блок, где выполняются необходимые вычисления с использованием соотношения (4).

Заключение

Таким образом, рассмотренная процедура усреднения результатов групповых измерений дальности КА в составе системы спутниковой связи с учетом необходимой коррекции индивидуальных результатов обеспечивает повышение точности измерения дальности КА пропорционально количеству Земных станций в составе системы.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (номер FSRZ-2023-0008).

Литература

1. Бетанов В.В., Махненко Ю.Ю. Совершенствование однопунктового способа навигации геостационарного спутника // Вестник Московского государственного технического университета им.Н. Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2009. – № 3. – С. 83-95.
2. Чмых М.К. Цифровая фазометрия. Аудио и связь, 1993.
3. Chang Donald C.D., Yung Kar W., Nunan William J., Cheng David C., Shuman Bruce E. Method and system for determining a position of a communication satellite utilizing two-way ranging. US Patent US6229477B1, 2001.
4. Скляр Б. Цифровая связь: Теоретические основы и практическое применение. – Вильямс, 2017.
5. Doody D. Basics of Space Flight. Bluroof Press, 2011. 312 p.
6. Panko S.P. et al. Digital range measurement of telecommunication spacecraft // 2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). – IEEE, 2020. – С. 1-4.
7. Панько С.П., Сухотин В.В., Югай В.В., Чумиков В.Ф. Цифровой фазометр. Пат. № 2207579 Российская Федерация, 2003. Бюл. № 18.

8. Панько С.П., Тихоненко И.Ю., Хныкин А.В. Измерение дальности космического аппарата в системе связи // Системы связи и радионавигации : материалы VIII Всерос. науч.-техн. конф. «Системы связи и радионавигации». Красноярск, 12-14 ноября 2024 г. – Красноярск : АО «НПП «Радиосвязь», 2024. 334 с.
9. Кучкин И.А., Сухотин В.В., Панько С.П., Адмаев О.В., Ильинский И.В., Садовиков Е.Н., Смольников Е.О. Исследование траектории движения искусственного спутника земли для исключения дополнительного набега фазы при определении координат // Фундаментальная информатика. информационные технологии и системы управления: реалии и перспективы. «ФИИТМ-2014» : материалы междунар. науч.-практ. конф. Красноярск, 25–27 ноября 2014 г. – Красноярск : СФУ, 2014. С. 216-223.
10. Панько С.П. Измерение дальности космического аппарата // Космические аппараты и технологии. – 2015. – №. 4 (14). – С. 10-21.
11. Луферчик А.В., Луферчик П.В., Галеев Р.Г., Богатырев Е.В. Анализ влияния атмосферных возмущений на энергетический потенциал спутникового радиоканала Ka-/Q-диапазонов // Ural Radio Engineering Journal. – 2023. – Т. 7, № 2. – С. 137-152. <https://doi.org/10.15826/urej.2023.7.2.003>

Для цитирования:

Панько С.П., Сухотин В.В., Сизых О.И., Тихоненко И.Ю., Хныкин А.В. Многоканальное измерение дальности коммуникационного космического аппарата // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.30>