



УДК 621.396.946

**<sup>1</sup>С. П. Панько, <sup>2</sup>М. С. Цимбал**

<sup>1</sup>*Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия*

<sup>2</sup>*АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва, г. Железногорск, Красноярский край, Россия*

## ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

*Рассмотрено многочастотное измерение доплеровского смещения частоты сигнала, вызванного движением космического аппарата, позволяющее повысить точность измерения скорости.*

*Ключевые слова: доплеровское смещение частоты, погрешность измерения скорости космического аппарата.*

**<sup>1</sup>S. P. Panko, <sup>2</sup>M. S. Tsimbal**

<sup>1</sup>*Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation*

<sup>2</sup>*JCS «Academician M. F. Reshetnev» Information satellite systems, Zheleznogorsk, Russian Federation*

## MEASUREMENT OF THE VELOCITY OF THE SPACECRAFT

*Reviewed multi-frequency measurement of Doppler shift frequency caused by the motion of the spacecraft, allows the abuser to increase the accuracy of speed measurement.*

*Key words: Doppler shift frequency, error of measurement of speed of the spacecraft.*

После дальности вторым по важности параметром движения космического аппарата (КА) является скорость его перемещения, т.е. производная расстояния между космическим аппаратом и наземным комплексом управления (НКУ) по времени, относительно НКУ. Задача точного измерения скорости движения КА была актуальной на всем протяжении космической эры. Предложено множество вариантов решения этой задачи, которые в основном опираются на оценку доплеровского сдвига несущей частоты. Так, в [1] рассматривается использование EISCAT UNF радара, работающего на частоте 930 МГц. При высоком отношении сигнал-шум стандартное отклонение частоты отраженного от КА одиночного импульса не более 0,2 Гц, стандартное отклонение скорости не превышает 5 мм/с. Радар излучает радиоимпульсы длительно-

стью 1920 мкс с периодом 20 мс и частотой квантования 1 МГц. Точность определения скорости 1 м/с вытекает из точности измерения частоты 6,2 Гц, но повышение точности измерения скорости требует соответствующего уменьшения погрешности измерения доплеровской частоты. Актуальным значением погрешности измерения этого параметра можно считать 0,1 Гц и менее. Вместе с тем необходимость излучения с НКУ сигнала весьма большой мощности привела к тому, что радарная методика измерения скорости КА пока не вышла за пределы теоретических рассуждений и уникальных экспериментов.

Традиционно относительная скорость движения источника и приемника радиоволны определяется по доплеровскому смещению частоты передаваемого сигнала. Доплеровское смещение частоты – физический эффект, связанный с изменением частоты колебаний или длины волны, воспринима-

емых наблюдателем (приёмником колебаний), в связи с движением источника волн и наблюдателя относительно друг друга. Эффект носит имя австрийского физика К. Доплера, обосновавшего в теории (1842) этот эффект в акустике и оптике. Измерение скорости подвижных средств, в том числе космических аппаратов, производят в основном на основе доплеровской методики, поскольку смещение частоты сигнала однозначно определяется относительной скоростью движения между подвижными излучателем и приемником. Измерение скорости КА относится к методам и средствам траекторных измерений с использованием линий радиосвязи.

Известно, например, устройство [2], в котором используются три территориально разнесенные наземные измерительные станции и приемоответчик КА. Измеренные доплеровские сдвиги частоты со всех измерительных станций (ИС) передаются в баллистический центр. Там вычисляются разности этих доплеровских сдвигов, эквивалентные измерениям радиоинтерферометров с базами, соответствующими расстояниям между ИС. В баллистическом центре по результатам измерений указанных скоростей и дальности рассчитывается траектория движения КА. Технический результат заключается в создании высокоточной и быстродействующей системы траекторных измерений с упрощенными конструкцией и эксплуатацией ее средств. Техническая сущность аналога заключена в использовании широко известного метода усреднения результатов измерения, разнесенными по пространству измерителями. В этом случае шумы, присутствующие в составе сигнала, принимаемого каждым измерителем, не коррелированы, что и объясняет эффективность пространственного усреднения. Способ характеризуется очень сложной и дорогостоящей реализацией. Кроме того, методическая погрешность измерения каждой измерительной станции определяет погрешность итоговой оценки.

Известно также устройство [3], содержащее антенну, интерфейсный модуль в составе генератора сигнала и приемника, подключенных к антенне, аналого-цифровой преобразователь, подключенный к выходу приемника, блок цифровой обработки в составе последовательно соединенных блока сжатия импульсов, банка из  $n$  фильтров, входы каждого фильтра параллельно подключены к выходу

блока сжатия импульсов, вычислительного блока и дисплея, причем вычислительный блок соединен с банком из  $n$  фильтров. В [3] реализована традиционная идея множества доплеровских частотных фильтров, используемых для разделения всего пространства доплеровских частот на множество узких областей с соответствием каждого фильтра одной из этих частотных полос. Зная пространственную частоту, обычно связанную с конкретными помехами, например, вида отражений от местных предметов, погодных влияний, наложений сигналов, можно использовать доплеровские фильтры для дискриминации помех, а также определять цели по доплеровской частоте. Таким образом, каждый доплеровский фильтр настроен на конкретное значение частоты Доплера  $F_D$ . Устройство [3] характеризуется низкой точностью измерения скорости КА в связи с большим значением случайной составляющей. Это объясняется тем, что аддитивный шум в составе принимаемого сигнала является причиной случайной составляющей результата измерения частоты Доплера, пропорциональной мощности шума.

Задачей настоящего технического решения является повышение точности измерения скорости космического аппарата за счет уменьшения случайной составляющей измерения частоты Доплера.

Повышение точности измерения может быть достигнуто при использовании более чем одной гармонической составляющей для измерения частоты Доплера  $F_{Di}$  по каждой  $i$ -й гармонике,  $0 \leq i \leq |n|$  с последующим усреднением результатов частных измерений. Индекс 0 соответствует первой, основной/центральной, гармонике. Практически во всех опубликованных теоретических и прикладных работах в области доплеровского измерения скорости, в том числе и в прототипе, используется одна основная гармоническая составляющая, которая является несущей частотой. На это однозначно указывается, например, в [4]. Однако спектр излучаемого радиоимпульсного сигнала всегда насыщен достаточно большим количеством гармонических составляющих, размещенных по частоте на значение, кратное  $1/T$ , где  $T$  – длительность периода излучаемых радиоимпульсов. На рис. 1 представлен спектральный состав условного сигнала с симметричным спектром относительно центральной частоты  $f_0$  с боковыми составляющими  $f_i$ . Каждая из гармониче-

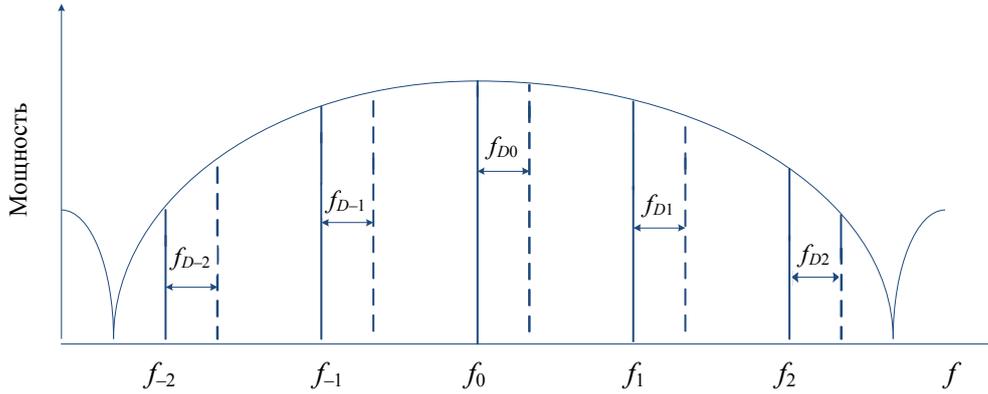


Рис. 1. Условная форма дискретного спектра полигармонического сигнала

ческих составляющих смещается на индивидуальное значение  $F_{Di}$ , обусловленное движением КА.

Скорость КА на основании измерения доплеровского смещения не только первой, но других гармонических составляющих выражается в общем виде:

$$V_{ri} = \left( \frac{f_{\text{пер}i}}{f_{\text{пр}i}} - 1 \right) \frac{C}{2}, \text{ [м/с]},$$

где  $i$  – номер гармоники,  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $C$  – скорость света в свободном пространстве. Здесь  $f_{\text{пер}i}$  – частота  $i$ -й гармоники сигнала, переданного НКУ;  $f_{\text{пр}i}$  – частота  $i$ -й гармоники принятого сигнала;  $f_{\text{пр}i} = f_{\text{пер}i} \mp F_{Di}$ . Знак зависит от направления движения КА относительно НКУ. Для определенности будем считать, что КА удаляется.

$$V_{ri} = \left( \frac{f_{\text{пер}i}}{f_{\text{пр}i} - F_{Di}} - 1 \right) \frac{C}{2} = \left( \frac{1}{1 - \frac{F_{Di}}{f_{\text{пер}i}}} - 1 \right) \frac{C}{2}. \quad (1)$$

Так как  $f_{\text{пер}i} \gg F_{Di}$ , то (1) можно преобразовать, опираясь на разложение в ряд Тейлора  $(1 - F_{Di}/f_{\text{пер}i})^{-1} \approx 1 + F_{Di}/f_{\text{пер}i}$ . Тогда

$$V_{ri} = \left[ \left( 1 + \frac{F_{Di}}{f_{\text{пер}i}} \right) - 1 \right] \frac{C}{2} = \frac{F_{Di}}{f_{\text{пер}i}} \frac{C}{2}. \quad (2)$$

Индекс  $i = 0$  означает, что при реализации (2) используется основная/центральная гармоническая составляющая – несущая частота.

Пусть измерение производится по первой гармонике,  $i = 1$ . Тогда

$$V_{r1} = \frac{F_{D1}}{f_{\text{пер}1}} \frac{C}{2}.$$

Но  $f_{\text{пер}1} = f_{\text{пер}0} + 1/T$ , где  $T$  – период повторения радиоимпульсов, переносящих тестовый сигнал.

В общем виде

$$V_{ri} = F_{Di} \frac{CT}{2(f_{\text{пер}0}T + i)}. \quad (3)$$

Так как  $V_{ri} = V_{r0}$ , то можно выразить доплеровские частоты на всех гармониках через  $F_{D0}$  центральной несущей

$$F_{D0} = F_{Di} \frac{f_{\text{пер}0}T}{(i + f_{\text{пер}0}T)}.$$

Поэтому умножение измеренного значения  $F_{Di}$  на соответствующий поправочный коэффициент

$$K_i = \frac{f_{\text{пер}0}T}{(i + f_{\text{пер}0}T)} \approx 1 - \frac{i}{f_{\text{пер}0}T}$$

(при условии  $|i| < |f_{\text{пер}0}T|$ ) обеспечивает приведение результатов измерения на всех гармониках к единому масштабу. Массив коэффициентов  $K_i$  формируется заранее и хранится в узле постоянной памяти.

Обычно  $f_{\text{пер}0}$  задаётся с точностью, не влияющей на погрешность определения скорости. Тогда единственным источником погрешности является  $\Delta_i$  – неточность измерения значений  $F_{Di}$ . Отсюда

$$V_{ri} + \xi_i = \frac{F_{Di} + \Delta_i}{f_{\text{пер}i}} \frac{C}{2} = \frac{F_{Di}}{f_{\text{пер}i}} \frac{C}{2} + \frac{\Delta_i}{f_{\text{пер}i}} \frac{C}{2}, \quad (4)$$

где  $\xi_i$  – погрешность измерения скорости, вызванная неточностью измерения частоты

Доплера на  $i$ -й гармонике. Основной причиной  $\Delta_i$  в первую очередь является шум, поэтому можно считать  $\Delta_i$  случайной составляющей с нулевым средним и дисперсией  $\sigma^2$ . Усреднение результатов пространственных измерений частоты Доплера с учетом корректирующих коэффициентов  $K_i$  уменьшает дисперсию шума, что обеспечивает повышение точности измерения скорости движения КА.

$$\begin{aligned} \overline{F_D} &= \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (F_{Di} + \Delta_i) K_i = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n F_{Di} K_i + \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \Delta_i K_i. \end{aligned} \quad (5)$$

Первое слагаемое (5) представляет собой усредненное значение  $F_{D0}$ , подстановка которого в первое слагаемое (3) даст истинное значение скорости КА при  $i = 0$ . Среднее значение случайной составляющей

$$\begin{aligned} \overline{\Delta} &= \frac{1}{n} \left( \Delta_0 + \Delta_1 - \frac{\Delta_1}{f_{\text{пер}0} T} + \Delta_2 - \frac{\Delta_2}{f_{\text{пер}0} T} + \dots \right) = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \Delta_i - \frac{1}{n f_{\text{пер}0} T} \sum_{i=0}^n \Delta_i. \end{aligned}$$

Вторым слагаемым можно пренебречь, поскольку оно в  $f_{\text{пер}0} T \gg 1$  раз меньше первого. Поэтому

$$\overline{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \Delta_i.$$

Оценим статистические характеристики  $\overline{\Delta}$ . Как принято выше, математическое ожидание  $M[\Delta_i] = 0$ , поэтому математическое ожидание среднего  $\overline{\Delta}$  также равно нулю, т.е.  $M[\overline{\Delta}] = 0$ . Здесь  $M[x]$  – символ математического ожидания  $x$ .

Дисперсия среднего вычисляется по стандартной формуле дисперсии суммы независимых случайных величин  $\Delta_i$ :

$$D[\overline{\Delta}] = \frac{1}{n^2} \sum_{i=0}^n D[\Delta_i].$$

Считая, что  $D[\Delta_0] = D[\Delta_1] = \dots$ , получим

$$D[\overline{\Delta}] = \frac{1}{n} D[\Delta_0],$$

где под  $D[\Delta_0]$  понимается дисперсия измерения по одной центральной гармонике.

На рис. 2 приведена структурная схема многочастотного доплеровского измерителя скорости космического аппарата.

Генератор сигналов ГС формирует последовательность радиоимпульсов с несущей частотой  $f_0$ , излучаемых в пространство с помощью антенны Ант. Линейчатый спектральный состав излучаемой последовательности радиоимпульсов представлен на рис. 1 сплошными линиями. Номер гармонической составляющей указан соответствующим индексом.

Принимаемый сигнал с выхода приемника Прм параллельно поступает на фильтры банка фильтров БФ в составе  $n$  фильтров  $\Phi_1 \dots \Phi_n$ . Каждый из фильтров настроен на частоту индивидуальной гармонической составляющей. Ширина полосы пропускания каждого фильтра должна выбираться исходя из максимального значения измеряемого доплеровского смещения и не должна превосходить разности частот между соседними гармониками.

Генератор гармоник ГГ формирует исходные гармонические составляющие, относительно которых измеряется соответствующее доплеровское смещение. Значение доплеровской частоты с выхода каждого фильтра измеряется соответствующим ИДЧ – измерителем доплеровской частоты.

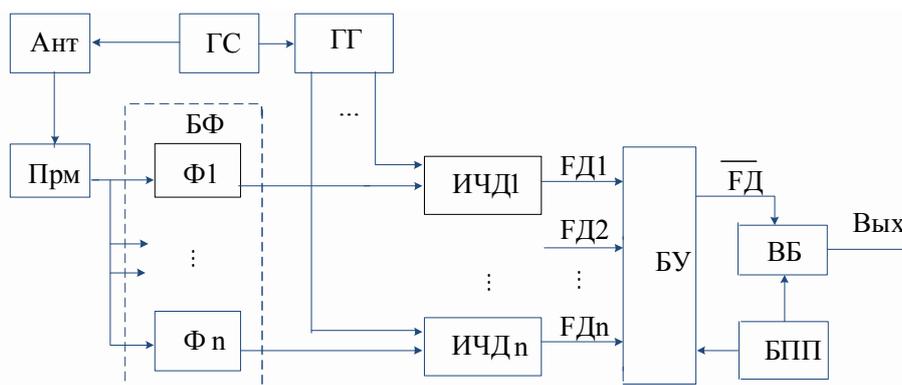


Рис. 2. Структурная схема измерителя скорости

Исследуем статистические характеристики (5). Здесь погрешность измерения скорости

$$\xi_i = \Delta_i \frac{C}{2f_{0i}}. \quad (6)$$

Матожидание ( $M$  – символ мат. ожидания)

$$M[\xi_i] = \frac{C}{2f_{0i}} M[\Delta_i], \quad (7)$$

Если  $M[\Delta_i] = 0$ , то  $M[\xi_i] = 0$ , т.е. оценка (3) не смещенная. Считая, что по порядку величин  $f_{0i} \approx f_i$ , получим, что для частот порядка 10 ГГц коэффициент перед  $M[\Delta_i]$  примерно равен 0,015, т.е. в математическом ожидании погрешность определения скорости составляет порядка 1,5 % погрешности измерения частоты Доплера.

Скорость КА в общем виде

$$V_i = f_{Di} \frac{C}{2f_{0i}} \left( 1 - \frac{i-1}{f_0 T} \right) = f_{Di} [K_1 - (i-1)K_2], \quad (8)$$

где константы

$$K_1 = \frac{C}{2f_0 T}, \quad K_2 = \frac{K_1}{f_0}.$$

Вместе с тем

$$f_{Di} = f_{D1} \frac{f_{0(i+1)}}{f_{0i}},$$

т.е. для получения  $f_{D2}$  достаточно умножить значение  $f_{D1}$ , полученное при измерении по первой гармонике, на постоянный коэффициент  $M_i$ . Этот коэффициент может быть достаточно большим, чтобы им пренебречь, а выравнивание доплеровских частот необходимо для выполнения операции пространственного усреднения, направленного на уменьшение погрешности измерения доплеровской частоты  $\Delta_i$ .

В блоке усреднения БУ вычисляется среднее значение по стандартной формуле:

$$\overline{f_D} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_{Di} M_i + \Delta_i. \quad (9)$$

Это усредненное значение используется при выполнении несложных математических вычислений, выполняемых в вычислительном блоке ВБ в соответствии с (8). Коэффициенты  $K_1$ ,  $K_2$  и  $M_i$  хранятся в блоке постоянной памяти ПЗУ. С выхода ВБ поступает измеренное значение скорости КА. Поскольку произведения под знаком суммы – одинаковые числа, то

$$\overline{f_D} = f_D + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta_i = f_D + \overline{\Delta_i}. \quad (10)$$

Если предположить, что частные погрешности  $\Delta_i$  распределены по нормальному закону с нулевым средним, то при достаточно большом  $N \Delta_i = 0$ . Этот же результат можно получить при усреднении группы  $N$  последовательных измерений на одной первой гармонике, что потребует времени измерения  $T_N = NT$ , где  $T$  – время однократного измерения. Поэтому описанное пространственное усреднение снижает погрешность измерения частоты Доплера или уменьшает время измерения в  $N$  раз относительно традиционного последовательного измерения при сопоставимых значениях погрешности измерения, вызванной шумом в канале передачи и дискретным преобразованием в процессе измерения частоты.

## Библиографические ссылки

1. Nygrén T., Markkanen J., Aikio A. and Voiculescu M. High-precision measurement of satellite velocity using the EISCAT radar. *Ann. Geophys.*, 30, 1555–1565, 2012.
2. Способ радиотехнических доплеровских угломерных измерений космического аппарата и система для осуществления данного способа : пат. № 2526401 Рос. Федерация / Ю. М. Урличич [и др.], опублик. 20.08.2014.
3. Automatic matched Doppler filter selection : пат. № 8970426 США / Р. Н. Stockmann [et al.], опублик. 03.03.2015.
4. Doppler beam-sharpened radar altimeter : пат. № 7911375 США / Winstead [et al.], опублик. 03.22.2011.

Статья поступила в редакцию  
16.10.2015 г.