

УДК 621.396.677 DOI 10.30894/issn2409-0239.2021.8.4.52.57

Синхронное сложение сигналов антенного поля со сдвигом импульсов дискретизации при сопровождении космического аппарата по целеуказаниям с учетом инерции движения антенн

С. И. Ватутин, к. т. н., с. н. с., vatutin.si@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

П. А. Козин, kozin.pa@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Для объединения нескольких сравнительно малых апертурных антенн в единую цифровую антенную решетку (цифровое антенное поле) с суммарной площадью приема телеметрического сигнала от космического аппарата ранее был предложен способ синхронного сложения сигналов отдельных антенн, разнесенных на достаточно большое расстояние, чтобы не затеняли друг друга. В основе метода лежит идея компенсации взаимных задержек между антеннами принимаемого сигнала путем соответствующего сдвига импульсов дискретизации сигналов разных антенн. В настоящей работе продемонстрирована работоспособность метода в режиме сопровождения КА по целеуказаниям на орбитах глобальных навигационных систем с учетом инерционности антенн. Показано, что в режиме сопровождения КА, близком к реальному, данный метод дает отношение сигнал/шум и вероятность битовой ошибки ближе к теоретическому пределу, чем в исследованном ранее идеализированном режиме с приравниванием угловых координат и скоростей антенн расчетным углам и скоростям КА в узлах целеуказаний.

Ключевые слова: антенная решетка, синхронное сложение сигналов, промежуточная частота, разность хода лучей, задержка распространения, целеуказания, отношение сигнал/шум, битовая вероятность ошибки

Synchronous Addition of Antenna Field Signals with a Shift of Sampling Pulses during Spacecraft Tracking by Target Designations with Allowance for the Inertia of Antenna Motion

S. I. Vatutin, *Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher*, vatutin.si@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

P. A. Kozin, kozin.pa@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The method of synchronous addition of signals of separate antennas was proposed previously for the aggregation of relatively small-scale aperture antennas into a single digital antenna array (digital antenna field) with a combined area for receiving telemetry signals from spacecraft when antennas are mutually spaced by a distance big enough for them not to shade one another. The method is based on the idea of compensating mutual delays between the antennas of the received signal by a corresponding shift of the sampling pulses of the signals of different antennas. The present paper demonstrates the efficacy of the method in the mode of spacecraft tracking by target designations in orbits of global navigation systems with allowance for the inertia of antenna motion. It is shown that in spacecraft tracking mode, which is close to the real one, this method gives a signal-to-noise ratio and bit-error probability closer to the theoretical limit than the values obtained for the idealized mode (analyzed earlier), which equates the angular coordinates and velocities of the antennas to the calculated angles and velocities of spacecraft in target designation nodes.

Keywords: antenna array, synchronous addition of signals, intermediate frequency, path difference, propagation delay, target designations, signal-to-noise ratio, bit-error probability

Введение

Настоящая работа является логическим продолжением работы [1], в которой была продемонстрирована работоспособность метода синхронного сложения сигналов антенного поля со сдвигом импульсов дискретизации на один и тот же фронт сигналов антенн. Показано, что исследуемый метод потенциально способен обеспечить в шесть раз большую скорость передачи телеметрической информации с космических аппаратов дальнего космоса по сравнению с классическим методом РСДБ. Выявлено, что для соблюдения условия когерентности складываемых радиосигналов тактовая частота F_c микротактов сдвига импульсов дискретизации $\Delta T_c = 1/F_c$ при модуляции BPSK должна быть больше промежуточной частоты $F_{пч}$ как минимум в 20, а лучше в 30 раз. При этом промежуточная частота $F_{пч}$ должна выбираться как можно ниже, вплоть до допустимого предела, когда порядок дискретизации m_d , определяемый (2), остается больше единицы, а частота дискретизации F_d , определяемая (1) в соответствии с [2, 3], остается меньше промежуточной частоты $F_{пч}$, что существенно снижает отклонения в худшую сторону отношения сигнал/шум и вероятности ошибки в бите от теоретического предела.

Следует отметить, что в разработанной в [1] модели сопровождения КА частота дискретизации F_d сигнала на промежуточной частоте $F_{пч}$ выбрана исходя из условия минимума искажений из-за наложений, размножаемых при дискретизации спектров исходного радиосигнала с оценкой верхней частоты $F_b = m_{лс} \cdot R_n$ в соответствии с формулой [2, 3]

$$F_d = \frac{4F_{пч}}{2m_d + 1}, \quad (1)$$

где порядок дискретизации m_d выбран, в свою очередь, по формуле

$$m_d = \text{floor} \left(\frac{F_{пч} - F_b}{2F_b} \right). \quad (2)$$

Здесь R_n — скорость передачи информации, $m_{лс}$ — количество учитываемых лепестков в спектре информационного сигнала.

Вместе с тем работа [1] выполнена для идеализированной модели процесса сопровождения

антенным полем космического аппарата с мгновенным выравниванием одновременно углов и угловых скоростей антенн и КА в узловых точках целеуказания, что невозможно осуществить в силу инерции антенн. Поэтому в данной работе продолжено исследование того же метода синхронного сложения сигналов антенного поля со сдвигом импульсов дискретизации с учетом ограниченных угловых скоростей и ускорений антенн с небольшим уточнением, касающимся оценки вероятности битовой ошибки, которая в работе [1] выполнена с запасом сверху, путем подстановки в известную формулу Котельникова:

$$P_{\text{ошиб}} = \frac{1}{2} - \text{erf} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{1-\rho}{2}} \right) / 2 \quad (3)$$

вместо отношения энергии бита E_b к спектральной плотности шума N_0 , отношения мощности сигнала P_c к мощности шума $P_{ш}$. Указанные отношения связаны известным соотношением

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P_c \cdot T_b}{P_{ш} / \Delta F} = \frac{P_c \cdot \Delta F}{P_{ш} \cdot R} = \frac{P_c \cdot \Delta F}{P_{ш} \cdot R} = \frac{P_c}{P_{ш} \cdot S_3}, \quad (4)$$

где $S_3 = R / \Delta F < 1$ — спектральная эффективность системы передачи информации в (бит/с)/Гц, R — скорость передачи информации в бит/с, ΔF — полоса частот системы передачи информации в Гц, T_b — длительность бита, $\rho = -1$ — коэффициент корреляции для фазовой манипуляции BPSK на π . В данной работе в выражении (3) использовано именно отношение E_b/N_0 , а не $P_c/P_{ш}$, что предотвращает допущенное в [1] завышение оценки битовой ошибки. В остальном оценка работоспособности метода синхронного сложения сигналов антенного поля со сдвигом импульсов дискретизации с учетом инерционности антенн проведена в тех же условиях, что и в работе [1], в частности для той же длительности шага сопровождения (моделирования) $dT = (t_j - t_{j-1}) = 0,1$ с и той же конфигурации антенного поля из семи малых антенн для сопровождения КА на орбитах высотой порядка 20 000 км, характерных для систем ГЛОНАСС, GPS, Galileo и BeiDou.

Допустим, период обновления задержек сигналов антенн поля относительно центральной антенны в устройстве синхронного сложения сигналов

антенн составляет $T_0 = M_0 \cdot dT = 600 \cdot dT = 60 \text{ с} = 1 \text{ мин}$, а целеуказания рассчитаны в узлах с периодом $T_{\text{ЦУ}} = M_{\text{ЦУ}} \cdot dT = 3000 \cdot dT = 300 \text{ с} = 5 \text{ мин}$ в соответствии с достаточно медленным движением КА на рассматриваемых орбитах. То есть задержки обновляются через $M_0 = 600$, а целеуказания меняются в пять раз реже через $M_{\text{ЦУ}} = 3000$ шагов модельного времени. В идеализированной модели сопровождения КА работы [1] в узлах целеуказаний угловые координаты диаграммы направленности $UM_{\text{ДН}ij}$, $AZ_{\text{ДН}ij}$ и угловые скорости $wUM_{\text{ДН}ij}$, $wAZ_{\text{ДН}ij}$ движения антенн приравнивались угловым координатам $UM_{\text{КА}j}$, $AZ_{\text{КА}j}$ и скоростям $wUM_{\text{КА}j}$, $wAZ_{\text{КА}j}$ движения КА:

$$\begin{aligned} UM_{\text{ДН}ij} &= UM_{\text{КА}j}; & AZ_{\text{ДН}ij} &= AZ_{\text{КА}j}; \\ wUM_{\text{ДН}ij} &= wUM_{\text{КА}j}; & wAZ_{\text{ДН}ij} &= wAZ_{\text{КА}j}. \end{aligned} \quad (5)$$

В промежуточных шагах угловые скорости в рассмотренной в [1] системе сопровождения оставались неизменными, а угловые координаты диаграмм направленности антенн менялись по линейному закону.

Учет инерционности антенн приводит к более реалистичной модели сопровождения КА, когда антенны движутся с угловыми ускорениями по углу места $eUM_{\text{ДН}j}$ и азимуту $eAZ_{\text{ДН}j}$, изменяющимися в узловые моменты целеуказаний при смене расчетных угловых скоростей движения КА. При этом в узлах целеуказаний угловые координаты диаграммы направленности $UM_{\text{ДН}j}$, $AZ_{\text{ДН}j}$ и угловые скорости $wUM_{\text{ДН}j}$, $wAZ_{\text{ДН}j}$ движения антенн вычисляются через угловые ускорения $eUM_{\text{ДН}j-1}$ и $eAZ_{\text{ДН}j-1}$ следующим образом:

$$UM_{\text{ДН}j} = UM_{\text{ДН}j-1} + wUM_{\text{ДН}j-1} \cdot dT + eUM_{\text{ДН}j-1} \cdot dT^2/2, \quad (6)$$

$$AZ_{\text{ДН}j} = AZ_{\text{ДН}j-1} + wAZ_{\text{ДН}j-1} \cdot dT + eAZ_{\text{ДН}j-1} \cdot dT^2/2, \quad (7)$$

$$wUM_{\text{ДН}j} = wUM_{\text{ДН}j-1} + eUM_{\text{ДН}j-1} \cdot dT, \quad (8)$$

$$wAZ_{\text{ДН}j} = wAZ_{\text{ДН}j-1} + eAZ_{\text{ДН}j-1} \cdot dT. \quad (9)$$

Сами угловые ускорения $eUM_{\text{ДН}j}$ и $eAZ_{\text{ДН}j}$ в моменты времени узлов целеуказаний меняются

в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} eUM_{\text{ДН}j} &= \\ &= (wUM_{\text{ДН}j+M_{\text{ЦУ}}} - wUM_{\text{ДН}j}) / (M_{\text{ЦУ}} \cdot dT), \end{aligned} \quad (10)$$

$$eAZ_{\text{ДН}j} = (wAZ_{\text{ДН}j+M_{\text{ЦУ}}} - wAZ_{\text{ДН}j}) / (M_{\text{ЦУ}} \cdot dT). \quad (11)$$

В промежуточных шагах угловые ускорения остаются неизменными:

$$eUM_{\text{ДН}j} = eUM_{\text{ДН}j-1}, \quad (12)$$

$$eAZ_{\text{ДН}j} = eAZ_{\text{ДН}j-1}, \quad (13)$$

тогда как угловые координаты и скорости меняются также в соответствии с выражениями (6)–(9).

Графики изменения угловых ускорений движения антенн поля по углу места и азимуту от времени в зоне радиовидимости КА представлены на рис. 1. Ускорения меняются в узлах целеуказаний каждые 5 мин. Графики изменения угловых скоростей движения КА (синяя линия), идеализированного сопровождения (зеленая линия) и учета инерционности антенн (красная линия) приведены на рис. 2, из которого видно, что учет инерционности антенн дает более точное соответствие угловых скоростей движения антенн угловым скоростям движения КА (более точная линейная аппроксимация вместо грубой ступенчатой). Результирующие графики угла места и азимута КА (синяя линия), диаграмм направленности антенн при идеализированном сопровождении (зеленая линия) и при учете инерционности антенн (красная линия) приведены на рис. 3, из которого видим, что сопровождение с учетом инерционности антенн можно отличить от углового движения КА только при достаточно большом увеличении. Соответственно уменьшение модуля диаграммы на наиболее динамическом участке траектории при учете ограничений на ускорения движения антенн, как показано на рис. 4, гораздо меньше, чем в рассмотренном в работе [1] идеализированном режиме сопровождения с приравниванием углов и скоростей движения антенн углам и скоростям КА в узлах целеуказаний.

Вследствие малых отклонений направления диаграмм направленности от направления на КА при учете ограничений на ускорения движения антенн графики отношения сигнал/шум и вероятности

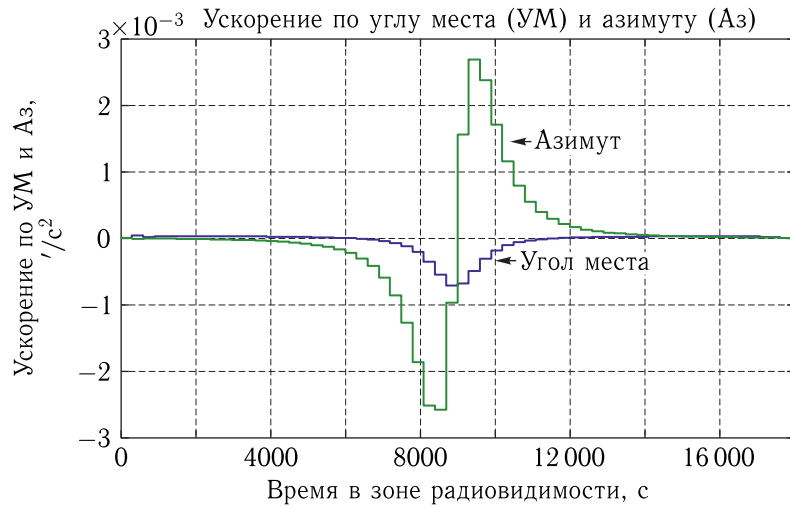


Рис. 1. Графики изменения угловых ускорений движения антенн в зоне радиовидимости КА

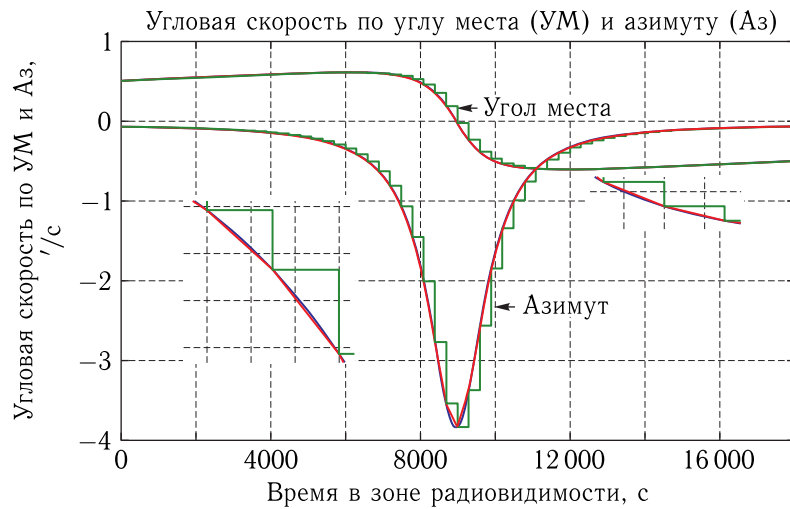


Рис. 2. Графики изменения угловых скоростей движения антенн в зоне радиовидимости КА

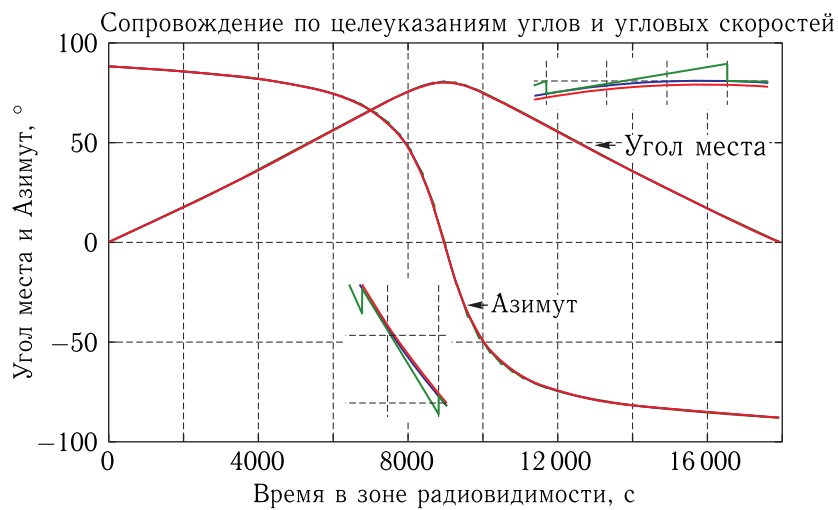


Рис. 3. Графики изменения углов движения антенн в зоне радиовидимости КА

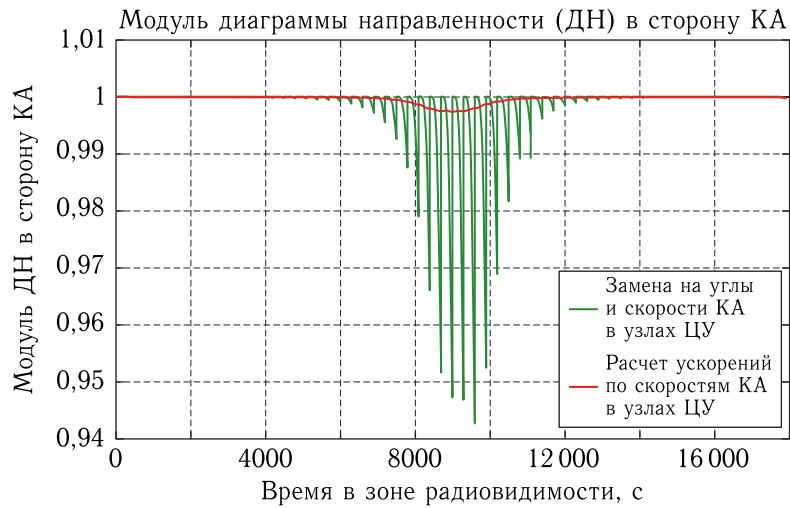


Рис. 4. Изменение диаграммы направленности антенн в сторону КА при идеализированном сопровождении и с учетом ускорений

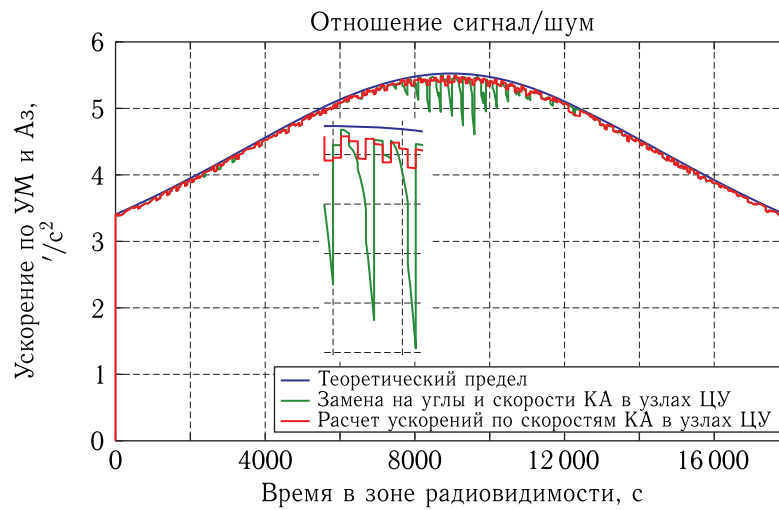


Рис. 5. Графики изменения отношения сигнал/шум в зоне радиовидимости КА

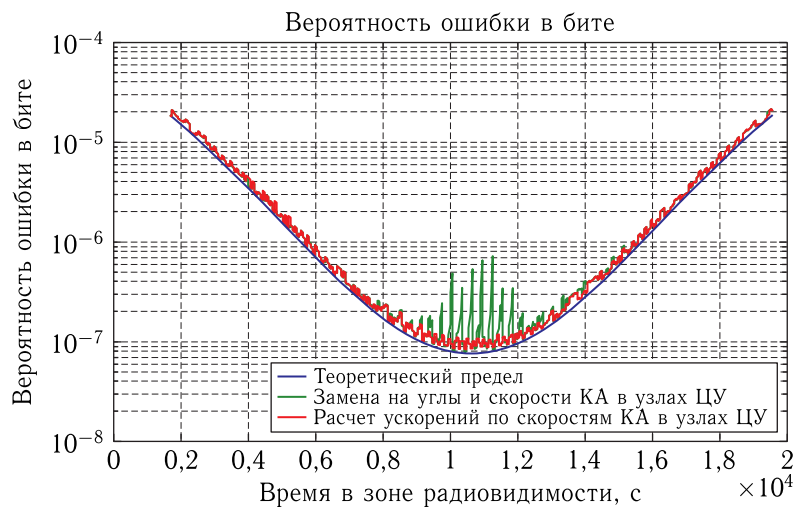


Рис. 6. Графики битовой ошибки в зоне радиовидимости КА

ошибки в бите на рис. 5 и 6 близки к теоретическому пределу как по краям, так и на наиболее динамическом участке в центре зоны радиовидимости, тогда как в идеализированном режиме на динамическом участке зоны радиовидимости на этих графиках наблюдаются существенные выбросы. Отметим, что на увеличенном фрагменте графиков на рис. 5 четко видно, что между двумя соседними узлами целеуказаний помещается ровно пять интервалов обновления задержек принимаемого сигнала между антеннами.

В целом из графиков на рис. 2–6 можно сделать вывод: метод синхронного сложения сигналов антенн со сдвигом импульсов дискретизации в близком к реальному режиме сопровождения КА по целеуказаниям с учетом инерционности антенн работоспособен и дает результаты, более близкие к теоретическому пределу, чем в рассмотренном ранее идеализированном режиме сопровождения

с мгновенным выравниванием одновременно углов и угловых скоростей антенн и КА в узловых точках целеуказаний, особенно на наиболее динамичных участках зоны радиовидимости КА.

Список литературы

1. *Ватулин С.И.* Синхронное сложение сигналов антенн со сдвигом импульсов дискретизации в идеализированном режиме сопровождения космического аппарата по целеуказаниям // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы.* 2020. Т. 7, вып. 4. С. 22–37.
2. *Романюк Ю.А.* Основы цифровой обработки сигналов. В 3-х ч. Ч. 1. Свойства и преобразования дискретных сигналов. Учеб. пособ. М.: МФТИ, 2005. 332 с.
3. *Лайонс Р.* Цифровая обработка сигналов: 2-е изд. Пер. с англ. М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. 656 с.