

Пути повышения точности независимого от ГНСС определения координат аварийных радиобуев в среднеорбитальном сегменте КОСПАС–САРСАТ

В. А. Архангельский¹, В. В. Селезнев²

¹к. т. н., доцент, ²к. т. н.

АО «Российские космические системы»

e-mail: varhangelskij@gmail.com

Аннотация. В статье анализируются способы повышения точности независимого от ГНСС определения координат аварийных радиобуев на наземных станциях среднеорбитального сегмента КОСПАС–САРСАТ. Описываются отличия решения навигационной задачи в среднеорбитальном сегменте КОСПАС–САРСАТ от решения навигационной задачи в классических радионавигационных системах. Подробно описан метод, позволяющий добиться значительного увеличения точности измерений частоты и соответственно точности определения координат узкополосных буев (буев первого поколения).

Показано, что некоторого улучшения точности можно достичь за счет использования измерений времен прихода сигнала на спутник-ретранслятор и оптимизацией выбора спутников-ретрансляторов для наведения на них антенн наземных станций. Рассмотрены широкополосные аварийные буи (буи второго поколения), точность независимого определения которых будет значительно выше, чем буев первого поколения.

Ключевые слова: КОСПАС–САРСАТ, СССПС, метод измерения частоты, точность, навигационная задача

Approaches to Accuracy Improvement of GNSS Independent Determination of Position Data of Emergency Radio Beacons in the Medium Earth Orbit Segment of the COSPAS–SARSAT System

V. A. Arkhangel'skiy¹, V. V. Seleznev²

¹candidate of engineering science, associate professor, ²candidate of engineering science

Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: varhangelskij@gmail.com

Abstract. This article analyzes the approaches to improvement of the accuracy of GNSS independent determination of position data of COSPAS–SARSAT radio beacons by the MEOLUT stations. It describes the differences in the locating process of medium Earth orbit segment of COSPAS–SARSAT and conventional space-based radio navigation systems. A method to improve the frequency measurement accuracy significantly is provided. Increasing of frequency measurement accuracy leads to an improvement in location accuracy of narrowband radio beacons (first generation beacons).

It is shown that an improvement in the measurement accuracy can be achieved by utilizing the measurements of signal arrival times at a relay satellite and an optimization of the relay satellite selection for pointing of the ground station antennas. Broadband beacons (second generation beacons) are considered, with the accuracy of their location being significantly higher than the one of the narrowband beacons.

Keywords: COSPAS–SARSAT, MEOSAR, frequency measuring, accuracy, locating

Введение

Важнейший вопрос для создающейся в настоящее время среднеорбитальной спутниковой системы поиска и спасания (СССПС) — точность независимого от ГНСС определения координат аварийных радиобуев (АРБ). Более чем 30-летний опыт использования при поисково-спасательных операциях низкоорбитального сегмента (НССПС) показал, что обеспечиваемая в нем точность независимого определения — не хуже 5 км в 95 % случаев — достаточна для успешного проведения поиска потерпевших бедствие. Получение такой же или лучшей точности в системе СССПС связана с серьезными трудностями, которые вызваны значительно большей высотой орбит космических аппаратов (КА) в СССПС и кратковременностью и узкополосностью сигналов, излучаемых аварийными радиобуями, которых в мире в настоящее время находится в эксплуатации более 3 млн штук. Исследованию путей преодоления этих трудностей и описанию разработанных в результате этих исследований способов, методов и алгоритмов обработки принятых на станциях приема и обработки данных среднеорбитального сегмента КОСПАС–САРСАТ (СПОИ–СО), посвящена данная статья.

Предварительный анализ способов независимого определения координат аварийных радиобуев в системе СССПС

В КОСПАС–САРСАТ различают 2 способа определения координат на наземных станциях приема и обработки (СПОИ). Первый — независимый от глобальных навигационных систем (ГНСС), при котором координаты АРБ определяются по навигационным измерениям его излученного сигнала. Второй — зависимый от ГНСС, при котором АРБ сам определяет свои координаты с помощью ГНСС-приемника и кодирует их в цифровом сообщении, а на СПОИ эти координаты извлекаются из цифрового сообщения.

Следует отметить, что навигационным приемником оборудованы не все АРБ. Кроме того,

за годы эксплуатации независимый способ определения координат зарекомендовал себя более надежным, чем зависимый. Требования СССПС (5 км в 95 % случаев за 10 мин после активации АРБ) выдвигаются именно к независимым решениям, в то время как зависимые решения считаются опциональными и требования к ним не выдвигаются. Далее в статье под определением координат будет подразумеваться определение координат независимым образом.

Космический сегмент СССПС представляет установленные на КА ГНСС ГЛОНАСС, GPS и Galileo ретрансляторы сигналов АРБ. Эти системы в терминологии КОСПАС–САРСАТ имеют название SAR/GLONASS, SAR/Galileo, SAR/GPS и DASS/GPS (спутники системы DASS/GPS не являются штатными для СССПС, однако могут использоваться опционально). Для независимого определения координат АРБ в СССПС доступны измерения времен прихода сигнала АРБ на спутники-ретрансляторы (это время имеет обозначение *TOA*) и измерения частот этого сигнала (*FOA*). Каждая СПОИ–СО оборудована 4 и более информационно-измерительными комплексами (ИИК), причем каждый ИИК принимает ретранслированные сигналы АРБ с одного из спутников-ретрансляторов, что позволяет иметь измерения *TOA* и *FOA* от одной и той же посылки АРБ, но ретранслированные через разные КА.

Хорошо известные и широко используемые в космических навигационных системах способы решения навигационных задач, т.е. способы независимого определения координат, в системе СССПС непригодны без изменения сигналов, излучаемых радиобуями. Действительно, при ширине спектра сигнала радиобуев, равной 1,6 кГц [1], и реальных энергетических потенциалах принимаемых СПОИ–СО сигналов $H \approx 30\text{--}35$ дБГц ошибка измерения времени распространения сигнала от АРБ до КА будет ~ 20 мкс и, следовательно, ошибка определения псевдодальности $\sigma_D \approx 6$ км. При такой ошибке псевдодальности получить точность определения местоположения 5 км с вероятностью 95 % при приеме всех посылок радиобуя в течение 10 мин можно только при геометрическом факторе $HDOP < 1$, что реально выполняется достаточно редко [2].

Использование доплеровского метода определения координат в СССПС затруднено из-за малости длительности интервала, на котором можно измерять частоту по немодулированной части сигнала (всего 0,16 с) и существенно меньших производных доплеровских сдвигов частоты по координатам буя из-за большой высоты орбит КА СССПС.

Хотя возможность и эффективность решения навигационной задачи только по измерениям частоты сигналов, принимаемых от нескольких навигационных КА, была показана достаточно давно [3], для использования в СССПС этой идеи необходимо повысить точность измерения частот сигналов радиобуя, ретранслированных несколькими КА.

История вопроса

С самого начала исследований и разработки системы СССПС Россия уделяла большое внимание обеспечению высокой точности определения координат радиобуев. Первые результаты этих исследований были представлены на втором заседании рабочей группы DASS-SAR/GLONASS (WG-2) 10 марта 2006 г. в Москве, в Российском институте космического приборостроения. Более полные результаты исследований были доложены на четвертой встрече WG-2 DASS-SAR/GLONASS 6–8 июня 2007 года в г. Железногорске (Россия).

В этих докладах было показано:

- при высокой точности измерения FOA ($\sigma_{FOA} = 0,04$ Hz), полностью развернутом космическом сегменте (24 КА) и наличии измерений от всех КА в зоне радиовидимости АРБ требуемая точность определения координат (≤ 5 км с вероятностью $\geq 0,95$) обеспечивается при любых движениях радиобуя в любой момент времени в любой точке земного шара. При этом в большинстве случаев получаемая точность определения координат в 3–8 раз лучше требуемых 5 км;

- совместное использование двух полностью развернутых систем 24 DASS/GPS и 24 SAR/GLONASS во всех случаях обеспечивает точность определения координат радиобуев не хуже 500 м;

- точность определения координат радиобуев по измерениям только TOA с ошибкой $\sigma_{TOA} = 10$ мкс значительно хуже.

Некоторые дополнительные результаты исследования точности определения координат радиобуев для отдельной московской СПОИ-СО приведены в [4]. Экспериментальные данные о точности определения координат орбитографических, тестовых и аварийных радиобуев, полученные на московской СПОИ-СО в апреле–мае 2014 г. были доложены на 28-м заседании Объединенного комитета КОСПАС–САРСАТ в июне 2014 г.

Эти данные полностью подтвердили вышеизложенные результаты теоретических исследований и моделирований. Следует также отметить, что полученные московской СПОИ-СО точности определения координат радиобуев в 3–5 раз лучше точностей, полученных СПОИ-СО других стран на фазе «Демонстрация и оценка» СССПС в 2015 г. [5].

Ключевым вопросом для получения высокой точности определения координат является получение высокой (лучше 0,1 Гц) точности измерения FOA на СПОИ-СО. Вопросы, касающиеся способов вычисления FOA и точности ее измерения, подробно обсуждались на C/S EWG-2/2009 в марте 2009 г. и 23-м Объединенном комитете КОСПАС–САРСАТ. Канада, США, Европейская комиссия и Россия изложили свои представления о методе и точности измерения FOA , которые реализованы на разработанных ими СПОИ-СО и предложения по их улучшению. К сожалению, дискуссии на эту тему не привели к выработке согласованного мнения по способу измерения частоты и этот вопрос остался открытым.

Точность измерений FOA

Способ измерения FOA , реализованный на российской СПОИ-СО, был кратко описан в документе C/S JC-23/8/18, представленном Россией в июне 2009 г. Так как, по-видимому, суть этого способа и ошибки измерений, влияющие на точность определения координат радиобуев, были не вполне поняты участниками обсуждений 23-го Объединенного комитета, здесь приводится более подробное описание, отражающее как методологическую, так и техническую его сторону.

Математическое определение FOA , а также уравнения для решения навигационной задачи

приведены в [6]. В этой же статье показывается, что для определения координат радиобуя достаточно знать разности измерений FOA ($DFOA$), сформированных по измерениям от одной и той же посылки АРБ, но принятых через разные КА. В этом случае ошибки измерения FOA , вызванные нестабильностью частоты АРБ для одной и той же посылки, ретранслированной через разные КА, **полностью исключаются**.

Потенциальная точность измерения $DFOA$, определяемая неравенством Крамера–Рао, равна

$$\sigma_{DFOA \min} \geq \frac{\sqrt{6}}{2\pi} \left(\frac{1}{(C/N_0)_1 T^3} + \frac{1}{(C/N_0)_2 T^3} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где $(C/N_0)_1$ и $(C/N_0)_2$ — энергетические потенциалы сигналов радиобуя, ретранслированных двумя спутниками (1-м и 2-м соответственно);

T — длительность интервала измерения.

При $(C/N_0)_1 = (C/N_0)_2 = 35$ дБГц и $T = 0,44$ с

$$\sigma_{DFOA \min} = 0,034 \text{ Гц.}$$

При $(C/N_0)_1 = (C/N_0)_2 = 30$ дБГц и $T = 0,44$ с

$$\sigma_{DFOA \min} = 0,06 \text{ Гц.}$$

С учетом необходимого «запаса» и потерь на реализацию можно принять: требуемая точность измерения $DFOA$ должна быть не хуже 0,15 Гц.

Способ измерения FOA , позволяющий получить точность определения $DFOA$, близкую к оптимальной

Как было показано в [6], для определения координат радиобуев достаточно знать только разности FOA ($DFOA$), технически удобнее в приемниках каждого канала (ствола) СПОИ-СО измерять FOA , а разности их получать при обработке этих измерений в алгоритме определения координат. По этой причине в данной статье описывается способ измерения FOA , реализованный на российской СПОИ-СО, однако при оценке ошибок измерений будем учитывать только ошибки, возни-

кающие из-за собственных шумов ретрансляторов и, в меньшей степени, из-за шумов СПОИ-СО.

Описываемый ниже способ запатентован в России [7]. Основная идея способа измерения FOA , примененного на российской СПОИ-СО, которая была изложена в документе С/С JC-23/8/18 от 09.06.2012, состоит в:

1) восстановлении чистой несущей на всей длине посылки буя за счет фазовой модуляции с индексом 1,1 рад принятого сигнала посылки достоверной информацией посылки с обратным знаком (ремодуляции);

2) измерении частоты этой ремодулированной посылки с использованием алгоритма, дающего точность, близкую к потенциальной.

Для лучшего понимания идеи ниже приводится подробное описание этого способа.

Входной информацией для алгоритма измерения частоты (FOA) являются комплексные цифровые отсчеты принятого приемником СПОИ-СО сигнала, передаваемого спутником-ретранслятором, гетеродинированные в область нулевых частот:

$$Z_k = Z(t_k) = S(t_k) + N(t_k) = A_{sk} e^{i2\pi f t_k} + N_k, \quad (2)$$

где $t_k = k\Delta t$, $\Delta t = 10 \mu\text{s}$, $A_{sk} = a(t_k) e^{i2\pi \varphi_k}$, $N_k = X_k + iY_k$, $a_s(t_k)$, $\varphi_k(t_k)$ — амплитуда и фаза сигнала буя, X_k , Y_k — независимые случайные величины с $\sigma_X^2 = \sigma_Y^2 = N_0 \Delta f_{\text{ш}}$, $\Delta f_{\text{ш}} = 80$ кГц — шумовая полоса приемника.

В этой формуле присутствует сигнал $S(t_k)$ только одного буя. На самом деле одновременно в Z_k могут входить сигналы нескольких буев, а также нескольких помех. В дальнейшем описании алгоритма обработки отсчетов Z_k для упрощения изложения также будет говориться о сигнале только одного буя. Необходимые указания об изменениях или дополнениях к алгоритму, возникающие из-за наличия сигналов нескольких буев и помех, не меняющие сути описываемых алгоритмов, будут даваться в тексте по мере необходимости.

Частота f сигнала $S(t_k)$ в формуле (2) равна

$$f = (FOA + f_{\text{г.СР}}) \left(1 - \frac{\dot{D}}{c} + \Delta_{\text{рел.}} \right) - f_{\text{г.СПОИ-СО}}, \quad (3)$$

где $f_{\text{г.СР}}$ — частота гетеродина спутника-ретранслятора,

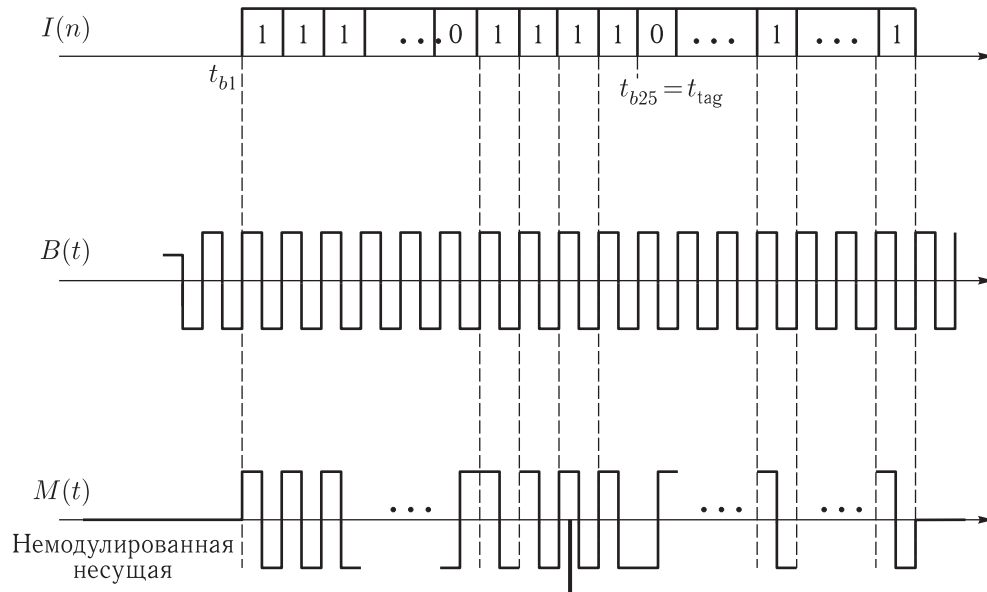


Рис. 1. Графики функций $I(n)$, $B(t)$, и $M(t)$

$f_{г.СПОИ-СО}$ — частота гетеродина приемника СПОИ-СО,

$\Delta_{\text{рел.}}$ — релятивистская поправка,

\dot{D} — радиальная скорость КА относительно СПОИ-СО,

c — скорость света.

Частота гетеродина спутника-ретранслятора формируется из частоты высокостабильного генератора навигационного сигнала спутника, а частота гетеродина приемника СПОИ-СО формируется из принятой на СПОИ-СО частоты навигационного сигнала, излучаемого этим спутником и равна

$$f_{г.СПОИ-СО} = (406,05 \cdot 10^6 \text{ Гц} + f_{г.СР}) \left(1 - \frac{\dot{D}}{c} + \Delta_{\text{рел.}} \right). \quad (4)$$

Подставляя это значение в (3) и учитывая, что частота квантования цифровых отсчетов Z_k в формуле (2) $F_{\text{кв.}} = \frac{1}{\Delta t}$ также формируется из частоты принятого на СПОИ-СО навигационного сигнала, получим

$$f = FOA - 406,05 \cdot 10^6 \text{ Гц}. \quad (5)$$

Возможные значения f лежат в области ± 40 кГц.

Фаза сигнала буя $\varphi(t_k)$ равна

$$\varphi_k = \varphi(t_k) = \varphi_0 + 1,1 \text{ рад} \cdot M(t_k), \quad (6)$$

где φ_0 — начальная фаза сигнала, то есть фаза сигнала в момент времени начала 25 бита цифровой информации сообщения посылки буя (t_{tag}),

$M(t_k)$ — функция, определяемая информацией, заложенной в посылку буя.

$$M(t_k) = \begin{cases} 0 & \text{при } -22\,000 \leq k < -6000, \\ B(t_k)[2I(n) - 1] & \text{при } -6000 \leq k \leq 22\,000, \end{cases} \quad (7)$$

где $I(n) = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ — двоичная цифровая последовательность посылки буя,

n — номер бита этой последовательности,

$B(t_k)$ — меандр с частотой $F_B \approx 400$ Гц, то есть периодом, равным длительности одного бита $2,5 \text{ мс} = 250\Delta t$;

$$B(t_k) = \begin{cases} 1 & \text{при } t_{bn} \leq t_k \leq t_{bn} + 125\Delta t, \\ -1 & \text{при } t_{bn} + 125\Delta t \leq t_k \leq t_{bn} + 250\Delta t, \end{cases} \quad (8)$$

где t_{bn} — момент начала n -го бита,

$t_{b25} = t_{\text{tag}}$ — начало отсчета времени в посылке, то есть за начало отсчета последовательности t_k принят момент времени $t_0 = t_{\text{tag}}$,

$$t_{bn} = t_{\text{tag}} - 6250\Delta t + 250n\Delta t. \quad (9)$$

На рис. 1 представлены графики функций $I(n)$, $B(t)$ и $M(t)$. На этих графиках моменты времени t_k не показаны.

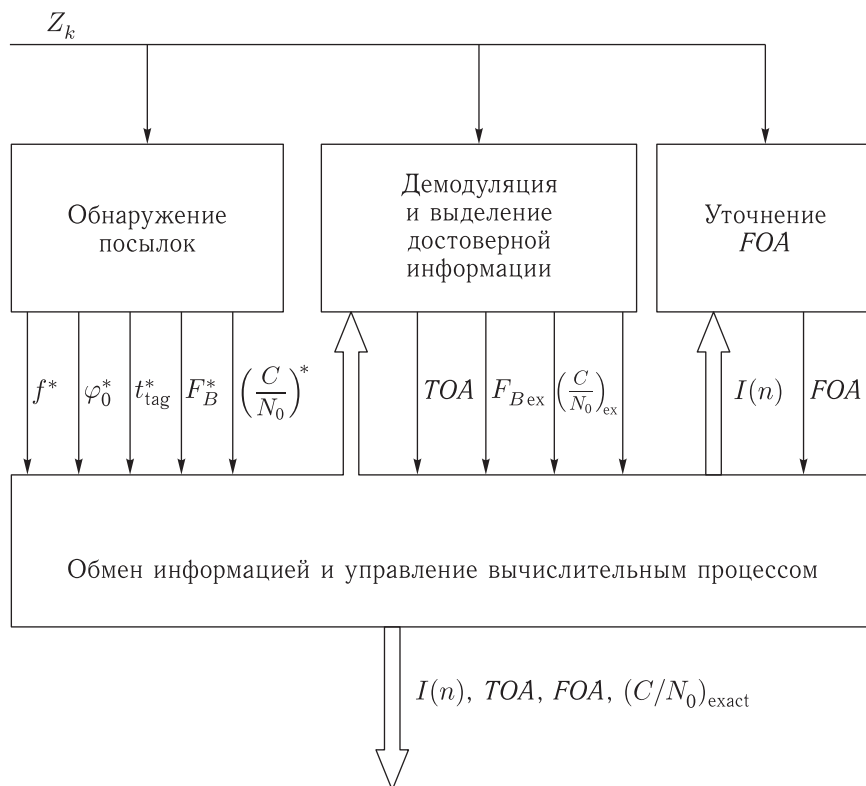


Рис. 2. Функциональная схема алгоритма обработки комплексных цифровых отсчетов с выхода одного канала СПОИ-СО

Алгоритм обработки комплексных цифровых отсчетов Z_k с выхода приемника каждого ИИК СПОИ-СО можно разделить на четыре взаимодействующих блока, функциональная схема взаимодействия которых показана на рис. 2. Входной поток Z_k поступает на блоки пакетами. Начало каждого пакета привязано к шкале времени навигационного сигнала, для чего используется время, полученное от приемника навигационного сигнала, принимаемого с того же спутника, что и сигнал СПОИ-СО, тактовая частота опроса (100 кГц) также формируется из принятого навигационного сигнала. Таким образом, любое значение Z_k является точно привязанным к бортовому времени спутника-ретранслятора.

Блок обнаружения посылок состоит из двух алгоритмов, решающих задачи обнаружения и предварительного (приближенного) измерения их параметров:

- алгоритма быстрого преобразования Фурье, который обнаруживает несущую частоту посылки и определяет ее значение (f^*), фазу φ_0^* и $(C/N_0)^*$ – отношение сигнал/шум посылки;

- алгоритма корреляционного анализа наличия синхрослова (первые 24 бита цифровой части посылки, одинаковые для всех посылок) и определения t_{tag}^* .

Здесь и далее верхним индексом «*» обозначаются приближенные значения параметров посылки. Для получения более точных значений f^* и t_{tag}^* используется квадратичная аппроксимация дискретных значений основного пика результата БПФ и корреляционной функции (рис. 3).

Используются три значения амплитуды спектральных отчетов БПФ:

- наибольшее – a_1 с частотой f_1 ,
- отстоящее от него на $-\Delta$ по частоте – a_2 ,
- отстоящее от a_1 на $+\Delta$ по частоте – a_3 .

Значение частоты максимум a в спектре вычисляется с помощью параболической аппроксимации и находится по формуле:

$$f_m^* = f_1 + \delta = f_1 - \frac{a_2 - a_3}{a_1 - \frac{a_2 + a_3}{2}}. \quad (10)$$

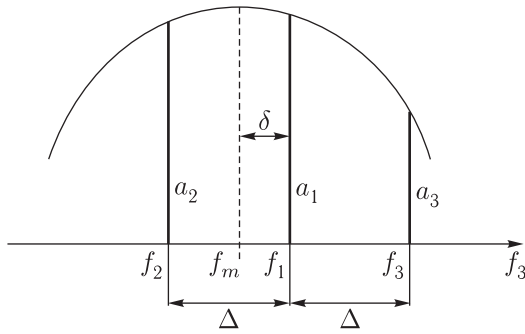


Рис. 3. Отсчеты амплитуд спектра, полученные БПФ в области максимума его огибающей

Аналогично вычисляется и $t_{tag.m}^*$.

Кроме этих функций, блок обнаружения посылки определяет значение тактовой частоты посылки (F_B^*) и проверяет посылку на достоверность, ее длительность и положение временной метки t_{tag}^* в середине посылки.

Полученные в результате работы этого блока приближенные значения параметров посылки f^* , φ_0^* , t_{tag}^* , F_B^* и $(C/N_0)^*$ используются последующими блоками в качестве необходимых исходных данных.

Блок обнаружения должен обнаруживать все посылки от всех буев, имеющиеся в потоке входных данных Z_k , полученном от данного спутника-ретранслятора, $(C/N_0)^*$ которых превышает заданный порог.

Блок демодуляции и выделения достоверной посылки, используя параметры f^* , φ_0^* , t_{tag}^* , F_B^* , $(C/N_0)^*$, производит демодуляцию посылки точно таким же образом, как это делается в геостационарном сегменте, выделяя из нее информацию $I^*(n)$ и затем, с помощью декодера БЧХ исправляет в $I^*(n)$ все неверные биты. Если произошло исправление не более двух ошибок и, кроме того, в синхрослове все 9 бит, начиная с 16 и по 24, верные — посылка считается достоверной и ее можно обозначать $I(n)$ (без звездочки). Если же в результате процедур декодирования БЧХ и проверки синхрослова посылка признана недостоверной, то включается процесс накопления сигнала посылки путем суммирования соответствующих значений Z_k , полученных от двух или более соседних по времени посылок.

Распознавание посылок от одного и того же буя производится по параметрам f^* и t_{tag}^* .

Демодуляция посылки, полученной в результате суммирования, дает более достоверную информацию ($I^*(n)$), которая после декодирования БЧХ и верификации синхрослова дает правильную $I(n)$ с большей вероятностью.

Кроме этой основной функции, блок демодуляции и выделения достоверной посылки уточняет необходимые для точной демодуляции параметры посылки $t_{tag\ exact} = TOA$ и $F_{B\ exact}$.

Блок уточнения FOA, используя параметры посылки f^* , φ_0^* , определенные блоком обнаружения, и $I(n)$, $t_{tag\ exact}$, $F_{B\ exact}$, полученные от блока демодуляции и выделения достоверной посылки, уточняет f^* , получая в результате более точное значение $f_{\ exact}$, то есть FOA.

Значение FOA вычисляется для **каждой** обнаруженной посылки, в том числе и тех посылок, по которым не получено достоверной информации ($I^*(n) \neq I(n)$), а достоверная информация $I(n)$ получена после суммирования сигналов нескольких посылок.

Полученная информационная последовательность $I(n)$ может быть использована для вычисления FOA любой посылки этого буя, причем в том числе в каналах приема сигналов этого буя через другие спутники-ретрансляторы. Такое использование $I(n)$ существенно увеличивает число посылок, параметры FOA и TOA которых могут быть измерены и, следовательно, повышает надежность и точность определения координат этого буя.

Уточненное значение FOA вычисляется по формулам, которые являются реализацией метода наименьших квадратов для данного случая:

$$FOA = f^* + F, \tag{11}$$

где

$$F = \frac{3I_m \left[\sum_{k=-N}^{+N} Z_k S_0^*(t_k) k \right]}{2\pi a^* N(N+1)(2N+1)\Delta t} \cong \frac{6}{2\pi TN} \cdot \frac{Im \left[\sum_{k=-N}^{+N} Z_k S_0^*(t_k) k \right]}{Re \left[\sum_{k=-N}^{+N} Z_k S_0^*(t_k) \right]}. \tag{12}$$

В этих формулах

$F = f_{\ ex.} - f^*$ — уточнение предварительной оценки частоты f^* ;

a^* — оценка амплитуды сигнала буя

$$a^* = \frac{1}{2N} \operatorname{Re} \left[\sum_{k=-N}^{+N} Z_k S_0^*(t_k) \right]; \quad (13)$$

Z_k — комплексные цифровые отсчеты сигнала с выхода приемника;

K — номер отсчета Z_k .

За нулевой номер ($k = 0$) принят момент времени $t_{\text{tag exact}}^* = TOA$;

$\Delta t = 10$ мкс — интервал квантования;

$N = \frac{T}{2\Delta t} = 22\,000$;

$T = 2N\Delta t$ — длительность посылки буя (440 мс);

$S_0^*(t_k)$ — нормализованное (с амплитудой, равной 1) комплексно-сопряженное значение сигнала с подставленными в него значениями частоты f^* , фазы φ_0^* и $I(n)$, то есть

$$S_0^*(t_k) = e^{-i[2\pi f^* t_k + \varphi_0^* + 1,1M(t_k)]}; \quad (14)$$

$\operatorname{Re} []$, $\operatorname{Im} []$ — действительная и мнимая части комплексного выражения в квадратных скобках соответственно.

Формулы (12) и (13) дают достаточно высокую точность определения FOA и a^* , если ошибка предварительной оценки f^* не превышает 0,5 Гц, что обеспечивается алгоритмом обнаружения, описанным выше, при $\frac{C}{N_0} \geq 30$ дБГц. При больших ошибках предварительного определения f^* можно сделать второе приближение для вычисления FOA_2 , используя в формулах (11)–(14) вместо f^* FOA первого приближения (FOA_1).

Среднеквадратическая ошибка измерения FOA за счет шумов ретранслятора и MEOLUT равна

$$\sigma_{FOA} = \frac{\sqrt{6}}{2\pi T \sqrt{(C/N_0)T}}, \quad (15)$$

а с. к. о. амплитуды посылки

$$\frac{\sigma_a}{a} = \frac{1}{\sqrt{2(C/N_0)T}}. \quad (16)$$

При $C/N_0 = 26$ дБГц, $\sigma_{FOA} = 0,067$ Hz, а $\frac{\sigma_a}{a} = 5,33\%$

При этих оценках не учтены ухудшения, вызванные неидеальностью формы модулирующего сигнала, а также возникающие из-за ошибок

$t_{\text{tag exact}}^* = TOA$ и $F_{B \text{ exact}}$. Поэтому реальные значения σ_{FOA} и $\frac{\sigma_a}{a}$ в $\sim 1,5$ раза хуже.

При больших (C/N_0) ошибки σ_{FOA} и σ_a будут, естественно, уменьшаться.

Кроме ошибок от шумов приемников на спутниках-ретрансляторах и СПОИ-СО и ошибок от нестабильностей частоты и фазы передатчиков буев, ошибки измерения FOA вызываются также нестабильностями условий распространения радиоволн в ионосфере на путях их распространения от буя до спутников, так называемые ионосферные ошибки. В разных областях ионосферы, через которые проходит путь распространения, эти ошибки только частично компенсируются, а их флуктуации на интервале длительности посылки практически независимы.

Проведенные оценки этих ошибок показали, что в периоды большой солнечной активности с. к. о. ионосферных ошибок FOA могут достигать величины

$$\sigma_{FOA \text{ ion.}} = 0,05 \text{ Гц.}$$

Тогда суммарная величина вычисления разности FOA ($DFOA$) при $C/N_0 = 30$ дБГц может достигать

$$\sigma_{FOA \text{ sum}} = 0,093 \text{ Гц.}$$

Другие способы повышения точности определения координат буев

Как отмечалось выше, высокая точность измерений FOA ($\sigma_{FOA \text{ sum}} = 0,093$ Гц) позволит определять координаты неподвижных радиобуев при полностью развернутой системе спутников-ретрансляторов (≥ 24 КА) в любой момент времени, в любой точке земного шара с ошибкой ≤ 2 км, с вероятностью $\geq 95\%$ при использовании измерений FOA , полученных от 3–4 спутников-ретрансляторов.

Для определения координат радиобуев, движущихся на море под действием течений, ветра и качки от волнения моря для решения 6-параметрической навигационной задачи (2 координаты, неопределенность частоты и три компонента вектора скорости буя), необходимы измерения FOA , полученные в общем случае не менее чем через

6 спутников-ретрансляторов, находящихся не менее чем в 3 разных орбитальных плоскостях. Такое возможно только при полностью развернутом космическом сегменте — не менее 24 КА на орбитах и наличии на СПОИ-СО не менее 6 антенн.

В некоторых случаях требуемую точность определения координат радиобуев, движущихся на море со скоростью до 3 м/с (6 узлов), можно получить и при использовании меньшего числа антенн на СПОИ-СО за счет применения, кроме измерений *FOA*, еще и измерения *TOA*.

Для того чтобы измерения *TOA* реально могли дать требуемую или близкую к ней точность определения координат буев, необходимо принять все меры по уменьшению погрешностей их измерений.

Первая из таких мер — использование усреднения измерений *TOA* за интервал времени 10–15 мин, т.е. получение по 12–18 измерений через каждый спутник-ретранслятор. Такое усреднение позволит в отсутствие негауссовых помех уменьшить ошибку измерения *TOA* в 3,5–4 раза, т.е. до величин 6–8 мкс вместо достигнутых на сегодняшний день на всех СПОИ-СО 20–30 мкс. Для усреднения измерений *TOA* (так же, как и *FOA*) нет необходимости использовать специальные алгоритмы и программы, так как это усреднение оптимальным образом реализует алгоритм метода наименьших квадратов, который используется при определении АРБ на СПОИ-СО.

Кроме этого, необходимо уменьшить систематические ошибки измерений *TOA*, вызванные неизвестностью (неопределенностью) и нестабильностью задержек сигналов в бортовой аппаратуре спутников-ретрансляторов. Для этой цели кажется наиболее приемлемым предложение Франции о юстировке спутников-ретрансляторов по сигналам орбитографических и тестовых буев с известными координатами. При этом следует отметить, что при такой юстировке не требуется высокая точность привязки моментов излучения этих буев, так как на ошибку определения координат буев по измерениям *TOA* (так же, как и по измерениям *FOA*) влияют только ошибки измерений (вычислений) разностей *TOA* (*DTOA*), полученных через разные спутники-ретрансляторы, а отнюдь не абсолютные значения ошибок *TOA*, вызванных задержками каждого ретранслятора. При реализации

такой юстировки задержек сигнала в ретрансляторах следует учитывать, что из-за их узкополосности величина задержек зависит от частоты ретранслированного сигнала (фазово-частотная характеристика ретранслятора нелинейна). Поэтому юстировку необходимо проводить на нескольких частотах (литерах) работы буев. Методика проведения и обработки юстировки задержек должна быть разработана.

Преимуществом этого способа является то, что для определения координат медленно-двигающихся на море под воздействием ветра, качки и течения АРБ не требуются измерения, полученные одновременно через 6 спутников-ретрансляторов (т.к. измерения *TOA* не зависят от скорости АРБ). Для получения ошибки определения координат ≤ 5 –7 км с вероятностью 95 % достаточно измерений *TOA*, полученных всего от 4-х спутников-ретрансляторов. Это существенно упрощает практическую реализацию этого способа при не полностью развернутом космическом сегменте СССПС. Результаты моделирования определения координат движущихся радиобуев за счет использования измерений *TOA* в дополнение к *FOA* приведены в статье [6]. К сожалению, данный способ пока еще не получил экспериментального подтверждения.

Еще один способ повышения точности определения координат радиобуев — оптимальный выбор спутников-ретрансляторов, по которым проводятся измерения СПОИ-СО из всех видимых. Этот способ эффективен при недостаточном числе антенн на СПОИ-СО. Алгоритм оптимального планирования перенацеливания антенн СПОИ-СО на спутники-ретрансляторы, реализующие этот способ, описан в [8].

И, наконец, очень эффективным способом повышения точности координат радиобуев, который может и должен быть реализован в более далекой перспективе, является переход в системе КОСПАС–САРСАТ к использованию широкополосных радиобуев [9]. Кроме повышения точности определения координат до величин порядка 200–300 м с вероятностью 95 % буев, движущихся с любой скоростью (в том числе и авиационных в падении), этот способ позволит уменьшить влияние узкополосных помех от радиосредств, незаконно работающих в диапазоне частот КОСПАС–САРСАТ.

К сожалению, переход системы КОСПАС–САРСАТ полностью на широкополосные радиобуи потребует значительного времени, по-видимому, не менее 7–10 лет. До этого необходимо использовать вышеперечисленные способы.

Выводы

Существенное повышение точности определения координат радиобуев первого поколения в СССР может быть получено за счет уменьшения ошибок измерений частоты FOA , вызванных собственными шумами приемников спутников-ретрансляторов и СПОИ-СО посредством увеличения интервала измерения FOA до полной длительности посылки радиобуя. Среднеквадратическая ошибка разностей измерений FOA ($DFOA$) не должна превышать 0,15 Гц, что соответствует ошибкам измерений FOA , вызванным собственными шумами спутников-ретрансляторов и СПОИ-СО $\sigma_{FOA\text{noise}} < 0,1$ Гц.

Некоторого улучшения точности определения координат АРБ первого поколения можно достичь с помощью измерений TOA . Целесообразно производить усреднение этих измерений за 10–15 мин и юстировку бортовых задержек сигналов в спутниках-ретрансляторах по сигналам орбитографических и тестовых буев. Этот способ требует разработки соответствующей методики юстировки и экспериментальной проверки. Точность определения координат АРБ только по измерениям TOA значительно ниже, чем при использовании FOA , однако при определенных условиях в некоторой зоне она может быть порядка требуемых 5 км.

Определенную помощь в повышении точности определения координат буев может оказать оптимизация планирования перенацеливания антенн СПОИ-СО на спутники-ретрансляторы, минимизирующая ошибки определения в зоне обслуживания СПОИ-СО.

В более отдаленной перспективе эффективным способом получения высокой точности определения координат (200–300 м) является использование широкополосных буев КОСПАС–САРСАТ второго поколения.

Список литературы

1. Specification for COSPAS–SARSAT 406 MHz distress beacons // C/S T.001 Issue 3 — Revision 16. December 2015.
2. Шебшаевич В. С., Дмитриев П. П., Иванцевич Н. В., Калугин А. В., Ковалевский Э. Г., Кудрявцев И. В., Кутиков В. Ю., Молчанов Ю. Б., Максютенко Ю. А. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. М.: Радио и связь, 1982.
3. Неволько М. П., Архангельский В. А., Михайлов А. В., Кульнев В. В. К вопросу о навигации потребителей с помощью навигационных спутников // Космические исследования, 1985, т. 23, № 6. С. 80.
4. Arkhangel'skiy V., Beloglazova N., Antonov D. COSPAS–SARSAT EWG-1/2012. Impact Of TOA/FOA Measurement Accuracy And Number of MEOLUT Antennas On Location Accuracy (Stand-Alone Moscow MEOLUT emulation). 26–30 March 2012, Montreal, Canada. http://www.cospas-sarsat.int/images/cospas_sarsat/pdf_uploads/EWG-1%202012%20Presentation-1-Russia.pdf (Дата обращения: 23.03.2017), 15 p.
5. Антонов Д. В., Федосеев А. В. Экспериментальные исследования точности определения координат аварийных радиобуев в среднеорбитальном сегменте КОСПАС–САРСАТ // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2016, т. 10, № 11. С. 22–27.
6. Антонов Д. В., Архангельский В. А., Белоглазова Н. Ю. Точность определения координат аварийных радиобуев по измерениям частот и времен прихода сигналов этих буев на космические аппараты среднеорбитального сегмента системы КОСПАС–САРСАТ // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2016, т. 10, № 1. С. 62–67.
7. Способ измерения частоты сигналов посылок радиобуев в космической системе поиска и спасания. Патент на изобретение № 2592050, Россия, 2015 г. Патентообладатель: АО «Российские космические системы». Авторы: А. М. Петушков, Е. О. Романов, В. В. Селезнев, В. А. Архангельский, Н. В. Дедов.
8. Антонов Д. В. «Оптимальное планирование наведения на КА наземных антенн среднеорбитального сегмента системы КОСПАС–САРСАТ» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2014, т. 1, вып. 4. С. 17–22.
9. Second Generation 406 MHz Beacon Implementation Plan // C/S R.017 Issue 1 — Revision 5. May 2016.