

Корректировка неидентичности радиоприёмных трактов в разностно-дальномерных системах

В. А. КОЗЬМИН, А. А. САЛИКОВ, А. Б. ТОКАРЕВ

АО «ИРКОС», Москва, Россия, e-mail: TokarevAB@ircoc.vrn.ru

Рассмотрены проблемы оценки взаимных задержек сигналов при их разностно-дальномерной обработке. На основе натурных испытаний однотипных радиоприёмных устройств показано, что неидентичность приёмных трактов может приводить к погрешностям до нескольких десятков наносекунд и, как следствие, к значительным погрешностям при определении местоположения источников радиоизлучения. Предложена и экспериментально проверена корректировка, позволяющая сократить погрешность оценивания задержек до 10 нс.

Ключевые слова: оценка местоположения источников радиоизлучения, разностно-дальномерная система, взаимные задержки сигналов, неидентичность радиоприёмных трактов.

Issues of mutual signals delays estimation during the time-difference-of-arrival processing are discussed. Based on the field tests of the radio receivers of the same type the nonidentity of the receiving paths is shown to be a source of the errors up to a few tens of nanoseconds, that may lead to a significant error in determining locations of the emitters. Adjustments, enabling to reduce the estimation error for the delays up to 10 ns, are proposed and experimentally performed.

Key words: radio emission sources location estimation, time-difference-of-arrival system, mutual signals delays, mismatch of radio receiving paths.

Разностно-дальномерные системы используют для оценки местоположения источников радиоизлучения (ИРИ). Такие системы состоят из территориально разнесённых радиоприёмных устройств (РПУ), одновременно принимающих сигналы от ИРИ [1—5]. Функционирование разностно-дальномерных систем базируется на определении разницы моментов прихода сигналов от ИРИ. Указанную взаимную задержку сигналов нужно измерять с наносекундной точностью, поэтому все используемые для приёма радиосигналов тракты должны быть тщательно откалиброваны.

Цель настоящей статьи — конкретизация требований к обработке сигналов в аналоговых трактах РПУ и разработка методики по коррекции отклонений свойств реальных приёмников от этих требований.

Выявление и численная оценка неидентичности трактов приёма. Регистрируемые радиоприёмной аппаратурой задержки сигналов зависят от расстояния между ИРИ и приёмниками, а также от запаздываний сигналов при их преобразованиях в приёмных трактах. Для выделения и обработки относительно узкополосного сигнала необходима его частотная фильтрация. Узкополосная фильтрация сигнала сопряжена со значительным запаздыванием отклика на выходе фильтра по отношению ко времени подачи воздействия на его вход. Абсолютная величина задержек, сопровождающих обработку сигналов, не имеет принципиального значения, если используемые приёмники однотипны, а задержки для разных радиоприёмных устройств совпадают. Однако при высоких требованиях к точности оценки местоположения ИРИ применение использования однотипных приёмников не может с должной точностью гарантировать равенство вносимых задержек. Из-за этого возникает потребность в специализированной калибровке аппаратуры, используемой в разностно-дальномерных системах.

Необходимость калибровки трактов приёма можно показать с помощью следующего эксперимента. Рассмотрим установку, структурная схема которой представлена на рис. 1. При идентичных трактах обработки, одинаковой длине со-

единительных кабелей и идеальной синхронизации РПУ взаимная задержка сигналов, получаемых двумя приёмниками от разветвителя, должна быть стабильно нулевой. Из-за погрешности подстройки локальных шкал времени РПУ, осуществляемой по PPS-сигналам от GPS/ГЛОНАСС-приёмников, задержка может отличаться от нуля, но при совпадении характеристик трактов приёма она для всех сигналов обрабатываемого диапазона частот должна представлять незначительную по значению константу [6]. Однако проведённые натурные эксперименты этого не подтверждают.

Для исследования влияния неидентичности трактов приёма на точность измерений задержек провели эксперимент. Для этого использовали рассмотренную установку (см. рис. 1), собранную на базе отечественных цифровых измерительных устройств АРГАМАК-ИС [7]. Широкополосный сигнал цифрового телевидения, поступающий на приёмники, разделялся на частотные фрагменты шириной 100—500 кГц. По каждому фрагменту оценивали взаимные задержки. Диаграмма изменения этих задержек оказалась частотно-зависимой (рис. 2). При перестройке РПУ по частоте «профиль» отклонения от нуля взаимных задержек $\Delta\tau(\Delta f)$ сдвигался вместе с частотой настройки, оставаясь неизменным по отношению к смещению Δf обрабатываемого сигнала от центральной частоты фильтров промежуточных частот (ФПЧ) приёмников. Следовательно, погрешность определения взаимных задержек связана с неидентичностью свойств ФПЧ. Как

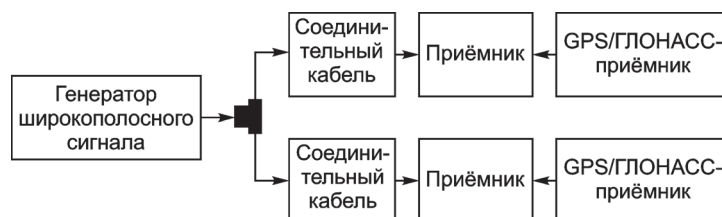


Рис. 1. Структурная схема для тестирования идентичности аналоговых трактов приёма

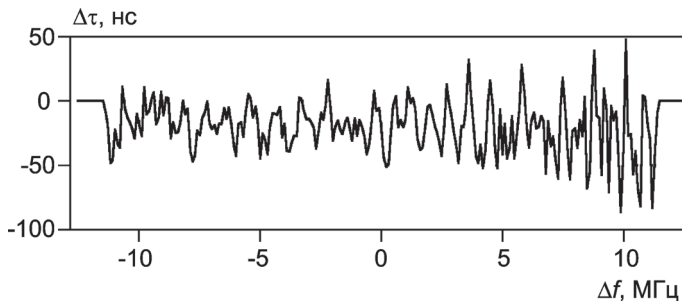


Рис. 2. Диаграмма изменения регистрируемых взаимных задержек сигналов в зависимости от смещения по частоте сигнала относительно центра полосы пропускания ФПЧ приёмника:

показал эксперимент, для приборов АРГАМАК-ИС погрешность измерений взаимных задержек, вызываемая неидентичностью ФПЧ, может достигать ± 50 нс.

Выявленный «профиль» отклонения взаимных задержек стабилен при измерениях в разные дни и при различных несущих частотах радиосигналов, поступающих на вход разветвителя. Поэтому можно провести взаимную калибровку трактов приёма. На описанной выше установке (см. рис. 1) тактовые генераторы приёмников жёстко синхронизированы, при этом один из них установлен в качестве ведущего, а другой — ведомого. После завершения подстройки шкал времени приёмников измеряют дискретный «профиль» отклонения взаимных задержек $\Delta\tau(m)$ ($0 \leq m < M$) с шагом калибровки между отсчётами $\Delta f_{ш.к.} = 0,1 \dots 0,2$ МГц. Нулевой отсчёт соответствует стартовому калибровочному фрагменту, центр которого (по отношению к середине пропускаемой ФПЧ полосы частот) размещён на частоте

$$f_k(0) = -0,5 (f_d - \Delta f_{ш.к.}),$$

где f_d — частота дискретизации выборок данных на выходе ФПЧ. После этого вычисляют отсчёты $\text{corr}[n]$ калибровочного массива:

$$\text{corr}[n] = \exp \left\{ -j2\pi f_n \sum_{i=0}^n \Pi_{\tau}[i] \right\}, \quad (1)$$

где $f_n = f_d / N$ — частотный интервал между отсчётами дискретного спектра, соответствующий быстрому преобразованию Фурье размерности N ; j — мнимая единица; $\Pi_{\tau}[i]$ — корректировочные поправки, соответствующие частоте $f_i = f_0 + if_n$.

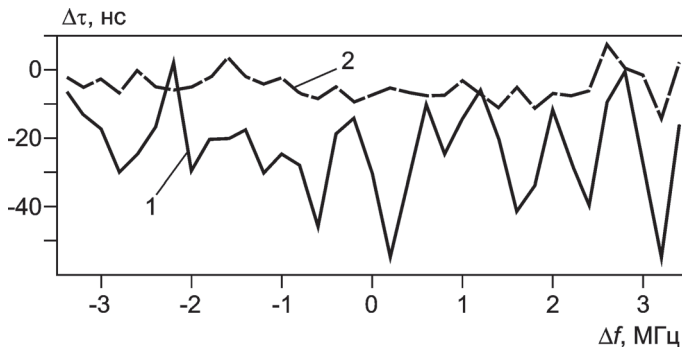


Рис. 3. Зависимость от частоты оценок взаимных задержек сигналов до (1) и после (2) коррекции

Корректировочные поправки $\Pi_{\tau}[i]$ определяются правилом

$$\Pi_{\tau}[i] = \frac{f_i}{\Delta f_{ш.к.}} \left\{ \Delta\tau \left[1 + \text{floor} \left(\frac{f_i - f_k(0)}{\Delta f_{ш.к.}} \right) \right] - \Delta\tau \left[\text{floor} \left(\frac{f_i - f_k(0)}{\Delta f_{ш.к.}} \right) \right] \right\},$$

где $f_0 = (f_n - f_d)/2$ — левая граница полосы пропускания ФПЧ; $\text{floor}(\cdot)$ — операция округления вниз.

Совокупность определяемых (1) отсчётов $\text{corr}[n]$ является необходимой и достаточной для калибровки.

Рекомендуемая калибровочная методика и пример её практического использования. Конкретизируем процедуру нахождения взаимных задержек по дискретным выборкам сигналов на выходах ФПЧ приёмников. Для минимизации объёма данных, пересылаемых между РПУ, а также упрощения частотной фильтрации обрабатываемых сигналов от прочих излучений, попадающих в обрабатываемую приёмником полосу частот, взаимные задержки вычисляют с использованием спектральной обработки данных. Сбор данных для оценки взаимных задержек подразумевает на каждом используемом РПУ определение спектра, а именно:

$$\dot{S}[n] = \text{fft} \{ s[k] \} = \sum_{k=0}^{N-1} s[k] w[k] \exp \left\{ -j2\pi \frac{nk}{N} \right\},$$

где $s[k]$ — последовательность выборок данных на выходе ФПЧ; $w[k]$ — весовая функция; $\text{fft} \{ \cdot \}$ — операция вычисления обратного дискретного преобразования Фурье.

Подмножество отсчётов этого спектра соответствующих обрабатываемому сигналу, пересылается между РПУ. Коррекция неидентичности трактов приёма проводится при расчёте взаимно-корреляционной функции сигналов, принимаемых разными РПУ. Её рекомендуется осуществлять умножением комплексного взаимного спектра сигналов на вычисленные ранее калибровочные коэффициенты $\text{corr}[n]$:

$$\dot{R}_{12}[k] = \text{fft} \{ \dot{S}_2[n] S_1^*[n] \text{corr}[n] \}, \quad (2)$$

где $\dot{S}_i[n]$ — отсчёты комплексного спектра сигналов, наблюдаемых на разных постах разностно-дальномерной системы; $\{ \cdot \}^*$ — знак использования комплексно-сопряжённой величины.

Оценка взаимной задержки сигналов базируется на поиске номера $k_{\max}$, максимального по абсолютному значению отсчёта рассчитанной выше дискретной взаимно-корреляционной функции:

$$k_{\max} = \arg \max \{ |\dot{R}_{12}[k]| \}.$$

Для уточнения положения пика можно рекомендовать параболическую аппроксимацию вершины взаимно-корреляционной функции. Соответствующую поправку можно вычислить следующим образом:

$$\Delta k = (R_{\text{пр}} - R_n) / [2(R_{\text{пр}} + R_n - 2R_{\max})],$$

где $R_{\max} = |\dot{R}_{12}[k_{\max}]|$ — максимальный по модулю отсчёт взаимно-корреляционной функции; $R_{\text{пр}}$, R_n — абсолютные значения двух соседних с ним отсчётов (правого и левого).

Итоговая взаимная задержка для текущей пары РПУ определяется как

$$t_{12} = (k_{\max} - \Delta k)/f_d + \Delta_m,$$

где Δ_m — поправка на основе сопоставления высокоточных меток времени, отражающих разницу «временной привязки» выборок данных, по которым рассчитывали спектры сигналов разных РПУ.

Результаты применения калибровки представлены на рис. 3. После корректировки разброс задержек сократился до ± 10 нс. Если процедуру калибровки усовершенствовать, можно дополнительно снизить негативное влияние неидентичности трактов приёма на определение взаимных задержек сигналов. Необходимо учесть, что рассогласование локальных шкал времени приёмников обычно превышает ± 10 нс, а интерференционные искажения из-за неудачного выбора мест установки приёмных антенн РПУ могут быть на порядок больше [6]. Таким образом, дополнительное повышение точности коррекции не является необходимым, а возможности калибровки трактов приёма (2) в большинстве случаев имеют практическое применение. Предложенная в настоящей работе методика используется в разностно-дальномерной системе, производимой НПК АО «ИРКОС». Основой этой системы служит сеть радиочастотных сенсоров, построенная на базе измерительных малогабаритных комплексов АРГАМАК-РСС либо радиомониторинговых приёмников АРГАМАК-ИС, оснащённых внешними модулями обработки навигационных сигналов. Разностно-дальномерная система функционирует под управлением специального программного обеспечения системы радиомониторинга АРМАДА [8].

К недостаткам методики следует отнести невозможность её «дистанционной» реализации. Для измерений «профиля» отклонения взаимных задержек $\Delta\tau[m]$ все приёмники, входящие в состав разностно-дальномерной системы, необходимо собрать вместе и откалибровать попарно, соединяя их в установку, показанной на рис. 1.

Практическое применение корректировки при оценке взаимной задержки сигналов. При корректировке измеряемых задержек (см. рис. 3) снижается погрешность, возникающая из-за неидентичности ФПЧ приёмников. Погрешности измерений, наблюдаемые при практическом использовании калибровок, будут более значительными, так как существует неидентичность радиочастотных трактов, предшествующих ФПЧ, а также взаимный дрейф локальных шкал времени приёмников.

Рассмотрим результаты натурных испытаний, в ходе которых с помощью откалиброванной пары приёмников последовательно, с интервалом в 10–15 мин измеряли взаимную задержку сигналов цифрового телевидения при разных частотах настройки приёмников (рис. 4). Наблюдаемый после коррекции разброс оценок взаимных задержек увеличился до ± 20 нс, но эти значения всё же в 2–4 раза ниже, чем без коррекции.

Заключение. Неидентичность приёмных трактов РПУ, используемых в разностно-дальномерных системах, может служить причиной существенных, составляющих иногда десятки наносекунд, погрешностей при оценке взаимных задержек сигналов, имеющих ширину спектра значительно меньше 1 МГц. Представленная методика корректировки позволяет в несколько раз снизить указанные погрешности и, как следствие, способствует повышению точности опреде-

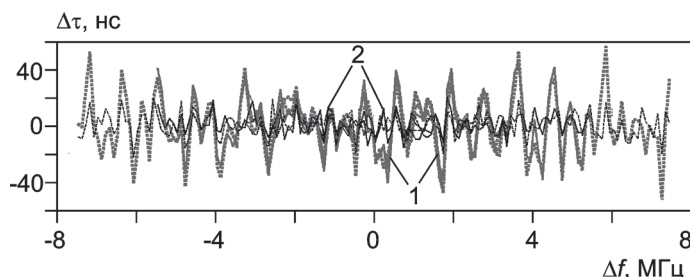


Рис. 4. Натурные испытания коррекции оценок взаимных задержек сигналов в диапазоне частот до (1) и после (2) коррекции

ления координат ИРИ разностно-дальномерным методом. Наибольший выигрыш от предложенной процедуры калибровки достигается в разностно-дальномерных системах, состоящих из небольшого числа радиоконтрольных постов. Для разностно-дальномерных систем, состоящих из большого количества приёмников, ценность данной методики несколько снижается, поскольку для таких систем трудоёмкость процедуры калибровки велика, а негативные эффекты от неидентичности трактов приёма могут быть скомпенсированы значительным объёмом собираемых и обрабатываемых данных.

Литература

1. Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства. М.: Горячая линия-Телеком, 2012.
2. Козьмин В. А., Павлюк А. П., Токарев А. Б. Сравнение угломерного и разностно-дальномерного методов местоопределения по критерию охвата территории при радиоконтроле // Электросвязь. 2014. № 2. С. 37–40.
3. МСЭ-R SM.2211-1. Сравнение методов определения географического местоположения источника сигнала, основанных на разнице во времени прихода и угле прихода сигнала. Женева, МСЭ-R, 2015.
4. Broumandan A., Tao Lin, Nielsen J., Lachapelle G. Practical Results of Hybrid AOA/TDOA Geo-location Estimation in CDMA Wireless Networks // Proc. IEEE VCT'08 Fall, Calgary, Alberta, Canada, 2008. N. 5. P. 287–293.
5. Chang, Y.-T., Yao-Tang Chang, Chi-Lin Wu, Hsu-Chih Cheng. The Enhanced Locating Performance of an Integrated Cross-Correlation and Genetic Algorithm for Radio Monitoring Systems. [Электрон. ресурс]: <http://www.mdpi.com/sci-hub.org/1424-8220/14/4/7541/html> (дата обращения 01.08.2015).
6. Калинин Ю. Е., Козьмин В. А., Крыжко И. Б., Поляков А. В., Саликов А. А., Токарев А. Б. Синхронизация радиоконтрольных постов разностно-дальномерной системы определения координат источников радиоизлучения // Радиотехника. 2014. № 3. С. 51–54.
7. Ашихмин А. В., Козьмин В. А., Першин П. В., Сергиенко А. Р., Рембовский А. М. Цифровые радиоприёмные устройства семейства АРГАМАК с улучшенными техническими характеристиками // Спецтехника и связь. 2012. № 1. С. 51–61.
8. АРМАДА. Автоматизированная система радиомониторинга. Техническое описание. [Электрон. версия]: http://www.ircos.ru/ru/asrm_armada.html (дата обращения 01.08.2015).

Дата принятия: 08.10.2015.