

УДК 621.396.96

И.А. ЕВСЕЕВ

Харьковский университет Воздушных Сил, Украина

ВРЕМЕННАЯ И ЧАСТОТНАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ В ДВУХПОЗИЦИОННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ

Рассматриваются вопросы синхронизации разнесенных в пространстве бортовых передатчика и приемника. Предложены возможные решения для достижения требований к многопозиционным системам.

временная и частотная синхронизация, многопозиционные и бистатистические системы, дистанционное зондирование поверхности, синтезирование апертуры антенны

Введение

Понятие синхронизации подразумевает наличие нескольких устройств (генераторов), обладающих связями, ограничивающих изменение фаз сигналов произвольным образом. Достаточно двух устройств, чтобы возникла проблема синхронизации.

Параметром синхронизации чаще всего является частота или фаза. Фаза равна интегралу от частоты, поэтому дисперсия ухода фазы меньше дисперсии ухода частоты. Однако, если даже случайный процесс, описывающий частоту, стационарный, то процесс изменения фазы будет принципиально нестационарным [1]. Поэтому уходы фазы во времени, особенно долговременные, могут достигать значительных величин.

Отсюда следует, что при кратковременной синхронизации целесообразно использовать фазовую синхронизацию (в этом случае смещение оценки невелико при относительно небольшой дисперсии). При длительной или непрерывной синхронизации предпочтительнее применять частотные методы синхронизации.

Вопросам синхронизации радиотехнических систем посвящено большое количество работ, в частности, [1, 2], однако в них не рассматривается синхронизация разнесенных позиций, движущихся, в общем случае, с различными скоростями и траекториями.

1. Формулирование проблемы

Установление синхронизации является одной из наиболее трудных проблем в радиотехнических системах (РТС). В случае, когда синхронизация уже установлена, последующее ее поддержание довольно часто обеспечивается за счет уже полученных временных соотношений.

Как правило, начало работы системы осуществляется без какой-либо предварительной временной привязки или же при весьма слабой временной привязке циклов работы передатчика и приемника, наличие которой позволило бы практически мгновенно установить синхронизацию.

Для установления синхронизации используется большое число различных методов [2]. Какой из используемых для установления синхронизации методов является наилучшим, зависит от назначения системы, времени, отводимого для синхронизации, а также размеров области неопределенности параметров принимаемого сигнала.

Если на приемной и передающей станциях с достаточной степенью точности известно время суток, то работа генераторов кодовых последовательностей, которые управляют порядком работы системы, может быть жестко привязана по времени, так что останется только неопределенность во времени, обусловленная только неизвестной дальностью.

2. Постановка задачи

Решение проблемы установления синхронизации начинается с первоначальной привязки шкалы времени (ШВ) передающей и приемной станции к единому мировому стандарту времени (ЕМВ) – универсальному координированному времени (*Universal Time Coordinated*, UTC). ЕМВ является эталонным и его применение предпочтительно в системах синхронизации РТС, использующих сложные сигналы. Методы получения мгновенного значения точного времени, использованные в системе синхронизации, имеют различную степень достоверности.

Вторичная синхронизация заключается в учете времени распространения зондирующего сигнала от передатчика до приемника и разработке действий на приемном конце радиолинии, обеспечивающих начало формирования гетеродинного сигнала в момент прихода зондирующего сигнала.

Целью статьи является рассмотрение вопросов синхронизации разнесенных в пространстве бортовых передатчика и приемника, возможных путей достижения требований к многопозиционным системам.

3. Синхронизация от GPS

Одним из способов привязки к ЕМВ является использование спутниковой системы *Global Positioning System* (GPS). Точность установления ШВ с использованием системы GPS составляет 100 мкс [3].

Радионавигационный сигнал, такой как у GPS, естественно создан как временной сигнал, поэтому довольно просто использовать GPS как "атомные часы в небе".

При отсутствии SA (*Selective Availability*), ошибки синхронизации были бы в лучшем случае равны приблизительно 10 наносекунд, а ошибка частоты – почти 10^{-10} . При условии хорошего обзора неба, многоканальный GPS-приемник может осреднять

ошибки от SA по семи или восьми спутникам, уменьшая эффект SA почти в три раза.

Однако, GPS-сигнал по своей природе не достаточно устойчив, чтобы обеспечить эталонную частоту для синтезирования апертуры.

Атомные генераторы и даже многие кварцевые генераторы обеспечивают на коротких интервалах более стабильную частоту, чем GPS. Тем не менее, все генераторы дрейфуют. Напротив, в долгосрочном плане система GPS всегда калибрована в пределах нескольких сотен наносекунд относительно UTC.

GPS-часы используют долговременную стабильность GPS и объединяют её с хорошей короткопериодической стабильностью качественных кварцевого (XO) или рубидиевого (Rb) генераторов. Эти генераторы имеют сигнал очень высокого качества на коротком интервале времени, но имеют тенденцию к уходу на более длительных периодах. Уход может контролироваться путем мягкого управления генератором от GPS.

Средняя частота генератора на некотором интервале времени может измеряться GPS. Точность этого измерения равна точности отсчета времени GPS (SA, 100 наносекунд, 1s), деленной на интервал времени осреднения.

На периодах времени в несколько минут это измерение настолько грубо, что не может калибровать генератор достаточно точно. На более длительных интервалах осреднения, составляющих около 1000 секунд, точность калибровки приближается к 10^{-10} (100 нс / 1000 с). Для точной калибровки генератор должен быть стабилен, т.е. смещение частоты должно быть относительно постоянно на интервале измерения.

При наличии GPS-приемника, контролирующего долговременный уход, сравнительно недорогой генератор специального изготовления (*ovenized*, ОСХО) достигает высокого уровня как краткосрочной, так и долговременной стабильности.

В разработке GPS-часов третьего поколения, показанной на рис. 1, генератор специального изготовления (*ovenized*, OCXO) и GPS-приемник жестко связаны на единой печатаной плате. Частота 10 MHz от специального (*double-oven*) кварцевого генератора используется непосредственно как источник отсчета времени для цифрового процессора сигнала GPS и чипа входного каскада радиочастоты (*RF front end chip*).

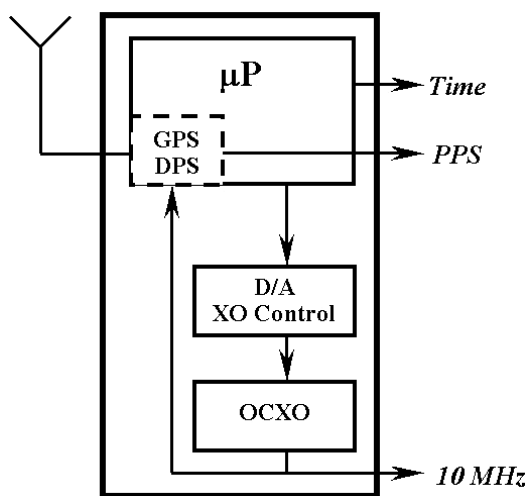


Рис. 1. GPS-часы третьего поколения

Более того, единый микропроцессор выполняет функции и GPS-приемника и управления часами. В разработках первого и второго поколений точность сигнала PPS-выхода (PPS – *pulse-per-second*) составляет от 40 до 100 нс, что ограничивает точность GPS-часов. В разработках третьего поколения генератор непосредственно сравнивается с сигналом GPS без использования PPS-выхода, позволяя приблизить точность к теоретическим пределам [3].

Главный выигрыш GPS-часов третьего поколения заключается в высокой надежности, ставшей возможной благодаря высокой степени интеграции.

Таким образом, первичная синхронизация ШВ передающих и приемных станций к ЕМВ может быть проведена по радиосигналам станций точного времени с использованием GPS-приемников или по собственным сигналам.

4. Особенности синхронизации многопозиционных РСА

Неопределенность частоты следования кодовых символов, фазы кодовой последовательности и частоты «несущей» может быть в значительной степени уменьшена, если в передатчике и приемнике установить достаточно стабильные генераторы опорных частот.

Однако не все проблемы могут быть решены таким простым способом. Так, относительные сдвиги частоты, вызываемые эффектом Доплера, часто невозможно предсказать, а они в свою очередь оказывают влияние на точность определения как частоты «несущей», так и тактовой частоты кодовой последовательности.

К многопозиционным РСА предъявляются более жесткие требования к синхронизации по времени и частоте и точности определения своего местоположения для компенсации собственного движения. В большей мере проявляется фазовый шум, что приводит к снижению качества радиолокационных изображений (РЛИ).

Синхронизация времени между разнесенными передатчиком и приемником требуется для точного измерения расстояния. Для наземных двухпозиционных РЛС временная синхронизация может быть легко достигнута, используя СРНС GPS, которая снабжает приемники высоко устойчивым сигналом PPS.

При использовании методики VLBI (*very long baseline interferometry*) (рис. 2), разработанной JPL для базы до 800 км можно ожидать точность до одной наносекунды [4].

Простой расчет погрешности для базового расстояния в 1000 км показывает, что можно ожидать среднее квадратичное отклонение 8 нс. Измерения, проведенные обычными маломощными приемниками GPS, которые используют только L1-сигнал на частоте 1575,42 МГц, показывают среднее квадратичное отклонение 15 нс, которое может быть достиг-

нута между двумя PPS. Стабильные местные генераторы (STALO – *stable local oscillators*) с этими PPS поправками обеспечивают среднеквадратичное отклонение менее 3 нс, используя недорогие GPS-приемники, как показано на рис. 3.

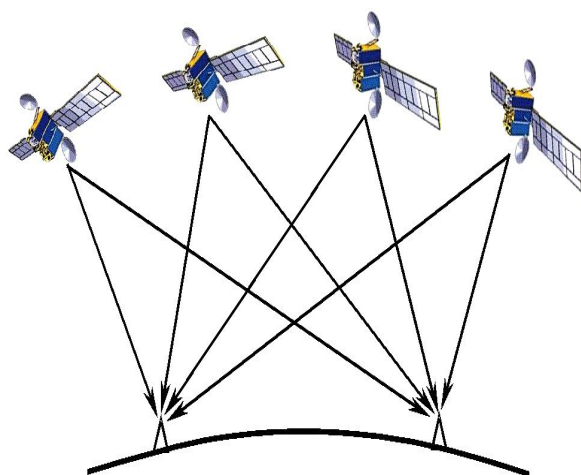


Рис. 2. Передача времени GPS с использованием VLBI методики

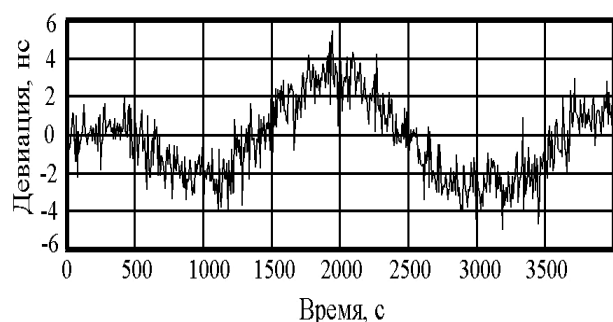


Рис. 3. Девияция между PPS сигналами двух GPS-приемников низкого качества

Другой путь в установлении временной синхронизации между двумя разнесенными позициями заключается в установлении двухсторонней линии связи. Это может быть как прямая радиосвязь, так и связь через спутник связи [5] (рис. 4).

Для двухсторонней временной синхронизации измерение временного интервала производится в обеих позициях. Местный PPS запускает счет интервала местного времени и, переданный через прямую радиосвязь или через спутник, останавливает

счет времени на другой стороне. Разницу во времени приблизительно можно записать в виде

$$T_1 - T_2 \approx \frac{1}{2}(\Delta T_1 - \Delta T_2),$$

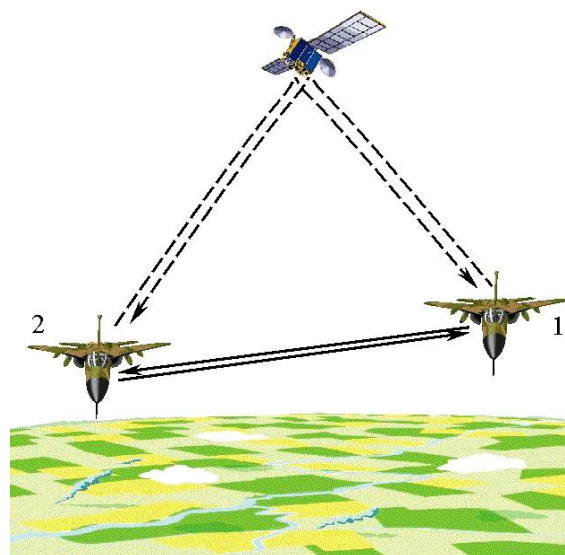


Рис. 4. Двухсторонняя временная синхронизация разнесенных позиций

где ΔT_i – разность измеренного времени между местным и принятым PPS на i -станции.

Теперь необходимо обменяться разницей во времени для вычисления расхождения временных шкал.

Этот метод ведет к среднеквадратическому отклонению приблизительно 0,5 нс [5]. Точное знание местоположения спутника при этом не является необходимым условием, поскольку время задержки переданного сигнала от одной и другой позиции равно и сигнал передается в нескольких миллисекундах.

Повышенные требования предъявляются к бортовым платформам. Из-за различных движений платформ длительность сигнала синхронизации должна составлять порядка несколько микросекунд, для того чтобы движение не снизило точности синхронизации.

Кроме того, интервал синхронизации должен быть коротким, и разность времени во времени

$T_1 - T_2$ должна быть передана на то же самое расстояние между позициями для получения согласованного времени. При вычислении разницы времени должно быть учтено движение позиций.

Далее координаты передающей позиции необходимо передать на приемную позицию для динамического регулирования временного интервала приема, чтобы избежать потери сигнала.

4.1. Частотная и фазовая стабильность. Точностные требования

Многообещающим методом синхронизации является не прямой метод с использованием согласованных высокостабильных генераторов в передатчике и приемнике, которые периодически синхронизируются, например, с помощью GPS-часов, устраняя, таким образом, долговременный уход частоты. Фазовая точность может располагаться менее чем от одного градуса до нескольких десятков градусов фазы сигнала на интервале когерентной обработки, в зависимости от вида обработки.

Для не прямой синхронизации, использующей идентичные генераторы в передатчике и приемнике, требуется стабильность фазы на время когерентного накопления сигнала T_n .

Таким образом, стабильность генератора определяется как $\Delta\Phi/2\pi f T_n$. В бистатическом случае обработка чувствительна к понижению частоты или "квадратическим" фазовым ошибкам на интервале T_n , и $\Delta\Phi$ может быть ослаблена до 90° [6]. Так, для $T_n = 1$ с и $f = 10$ ГГц требуемая стабильность составляет $2,5 \times 10^{-11}$. Она может быть достигнута температурной стабилизацией кварцевых генераторов.

Более высокие требования к стабильности фазы существуют для интерферометрических РСА. Требования зависят от базового расстояния и требуемого качества интерферограммы. Типичным требованием является максимальная фазовая ошибка $3,6^\circ$ в

течение среднего времени регистрации около 30 секунд, например для системы PAMIR. Это приводит к точности частоты

$$|f_1 - f_2| < 333,3 \cdot 10^{-6} \text{ Гц,}$$

которая является достижимой только при использовании сверх высокостабильных генераторов, например PSI. Стабильность для них составляет 3×10^{-11} за 1 с на частоте 10 ГГц [7].

Использование 10 МГц генераторов *BVA-cut oven-stabilized crystal oscillator* (ОСХО) позволяют достигнуть ухода частоты приблизительно 10^{-9} Гц в день. Однако такие системы имеют очень высокую стоимость.

Уменьшить стоимость такой высокостабильной установки можно, используя двухсторонние сигналы фазовой синхронизации, которые получены от устойчивых местных генераторов, установленных на различных платформах.

Еще одним из основных требований для интерферометрических РСА, помимо сверхвысокостабильных генераторов, является необходимость точного определения базы между передатчиком и приемником.

Для достижения фазовой ошибки в $3,6^\circ$ расстояние между двумя позициями должно быть измерено с 3 мм точностью, при несущей частоте РСА – 10 ГГц. Это связано с ошибкой измерения времени 10 пс.

4.2. Измерение базового расстояния

Для решения проблемы измерения расстояния между двумя бортовыми платформами (базы) с необходимой точностью используется генераторы со взаимной синхронизацией.

Сигнал синхронизации формируется стабильным генератором и передается от одной позиции к другой.

Принятый сигнал компенсирует разницу частот между сигналами (рис. 5).

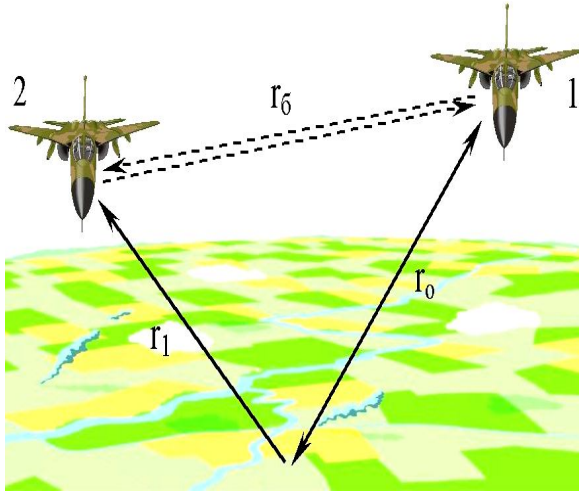


Рис. 5. Бистатическая конфигурация с разнесенными позициями

Миллиметровая точность измерения базового расстояния требует учета влияния фазового шума генератора [8]. Фазовая характеристика генератора может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} \varphi_i(t) &= 2\pi \int_0^t (f_i + \alpha_i(t')) dt' + \Delta\Phi_i(t) = \\ &= \Phi_i(t) + \Psi_i(t) + \Delta\Phi_i(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где f_i – частота генератора; α_i – медленно изменяющаяся ошибка частоты; $\Delta\Phi_i(t)$ – фазовый шум генератора.

Излученный различными позициями сигнал представим в виде

$$x_i(t) = X_i(\Phi_i(t) + \Psi_i(t) + \Delta\Phi_i(t)), \quad (2)$$

где i обозначает позицию (1 или 2).

В позиции 1 фаза сигнала, отраженного от Земли

$$\begin{aligned} \Phi_{g1}(t) &= \Phi_1(t - \tau_o) + \Psi_1(t - \tau_o) + \\ &+ \Delta\Phi_1(t - \tau_o) - \Phi_1(t) - \Psi_1(t) - \Delta\Phi_1(t), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\tau_o = 2r_o / c$ – время запаздывания сигнала; c – скорость света.

Фазу сигнала, излученного позицией 2 и принятого в позиции 1, необходимого для точного измерения расстояния между позициями, представим как

$$\begin{aligned} \Phi_{b1}(t) &= \Phi_2(t - \tau_o) + \Psi_2(t - \tau_o) + \\ &+ \Delta\Phi_2(t - \tau_o) - \Phi_1(t) - \Psi_1(t) - \Delta\Phi_1(t). \end{aligned} \quad (4)$$

В позиции 2, расположенной в нескольких километрах от позиции 1, фаза прямого сигнала

$$\begin{aligned} \Phi_{b2}(t) &= \Phi_1(t - \tau_b) + \Psi_1(t - \tau_b) + \\ &+ \Delta\Phi_1(t - \tau_b) - \Phi_2(t) - \Psi_2(t) - \Delta\Phi_2(t). \end{aligned} \quad (5)$$

Фазу сигнала, отраженного от земли и принятого позицией 2, запишем в виде

$$\begin{aligned} \Phi_{g2}(t) &= \Phi_1(t - \tau_1) + \Psi_1(t - \tau_1) + \\ &+ \Delta\Phi_1(t - \tau_1) - \Phi_2(t) - \Psi_2(t) - \Delta\Phi_2(t), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\tau_1 = (r_o + r_1) / c$. Тогда разность фаз между позициями между позициями определим как

$$\begin{aligned} \Phi_{b2}(t) + \Phi_{b1}(t) &= \Phi_1(t - \tau_b) + \Psi_1(t - \tau_b) + \\ &+ \Delta\Phi_1(t - \tau_b) - \Phi_2(t) - \Psi_2(t) - \Delta\Phi_2(t) + \\ &+ \Phi_2(t - \tau_b) + \Psi_2(t - \tau_b) + \Delta\Phi_2(t - \tau_b) - \\ &- \Phi_1(t) - \Psi_1(t) - \Delta\Phi_1(t). \end{aligned} \quad (7)$$

Допустим, что оба генератора обладают медленно изменяющейся ошибкой частоты за какой-то период времени. Следовательно, за короткий промежуток времени можно пренебречь фазовым шумом:

$$\Psi(t - \tau) \cong \Psi(t).$$

Тогда, выражение (7) можно привести к виду

$$\Phi_{b2}(t) + \Phi_{b1}(t) \cong \Phi_1(-\tau_b) + \Phi_2(-\tau_b). \quad (8)$$

В общем случае, разность фаз колебаний сигнала и когерентного гетеродина зависит от частоты излучения и времени распространения сигнала до объекта и обратно

$$\varphi = 2\pi f\tau = 2\pi(f_1 \pm f_2)\tau,$$

где знак плюс соответствует случаю $f_1 < f_2$, а минус – случаю $f_1 > f_2$ [9, 10].

При этом базовое расстояние может быть рассчитано следующим образом:

$$r_b(t) = \frac{c}{2\pi(f_1 + f_2)} (\Phi_{b2}(t) + \Phi_{b1}(t)). \quad (9)$$

Поскольку фазовый шум все же присутствует ($\Delta\Phi(t) \neq 0$), точность измерения основания базового расстояния существенно ниже. С учетом этого, (8) запишем в виде

$$\begin{aligned} \Phi_{b2}(t) + \Phi_{b1}(t) \cong & \Phi_1(-\tau_b) + \\ & + \Phi_2(-\tau_b) + \Delta\Phi_1(t - \tau_b) - \Delta\Phi_1(t) + \\ & + \Delta\Phi_2(t - \tau_b) - \Delta\Phi_2(t). \end{aligned} \quad (10)$$

Исходя из (9), существует следующее отношение между среднеквадратической ошибкой измерения расстояния σ_r и фазы σ_Φ :

$$\sigma_r = \frac{c}{2\pi(f_1 + f_2)} \sigma_\Phi. \quad (11)$$

Примем, что $\Delta\Phi_1$ и $\Delta\Phi_2$ – независимые случайные величины, имеющие равные спектральные плотности мощности $W_\Phi(f)$. С учетом того, что автокорреляционная функция равна

$$R_{xx}(\tau) = \overline{x(t)x(t-\tau)},$$

среднеквадратическую ошибку измерения фазы можно определить следующим образом:

$$\sigma_\Phi^2 = 4(R_{\Phi\Phi}(0) - R_{\Phi\Phi}(\tau_b)). \quad (12)$$

Согласно теореме Винера-Хинчина, автокорреляционная функция может быть найдена по энергетическому спектру фазового шума

$$R_{\Phi\Phi}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} W_\Phi(f) e^{j2\pi f\tau} d\omega. \quad (13)$$

Тогда выражение (12) можно привести к виду

$$\begin{aligned} \sigma_\Phi^2 &= 4 \int_{-\infty}^{+\infty} W_\Phi(f) [1 - e^{j2\pi f\tau_b}] df = \\ &= 16 \int_{-\infty}^{+\infty} L(f) \sin^2(\pi f\tau_b) df, \end{aligned} \quad (14)$$

где $L(f)$ – односторонняя спектральная плотность фазового шума.

Для малошумящих кварцевых генераторов $L(f) \approx -160$ дБ/Гц для частот $f \geq 1$ кГц. Для частот $f < 10$ Гц фазовый шум уменьшается до 30 дБ на октаву. Поэтому поведение фазового шума может быть смоделировано следующим выражением:

$$L(f) = N^2 L_1 10^{-3\log(f)}, \quad (15)$$

где L_1 – спектральная плотность фазового шума на 1 Гц; N – коэффициент умножения частоты.

При использовании периодического сигнала для измерения базового расстояния с высокой точностью и для компенсации низкочастотного дрейфа фазы выражение (14) преобразуется к следующему виду:

$$\sigma_\Phi^2 = 16N^2 L_1 \int_{-\infty}^{+\infty} 10^{-3\log(f)} \sin^2(\pi f\tau_b) df. \quad (16)$$

На рис. 6 представлена зависимость ошибки измерения базового расстояния σ_r от удаления между позициями для типичного высокостабильного 10 МГц кварцевого генератора при различных значениях L_1 (несущая частота 9,45 ГГц; $N = 945$).

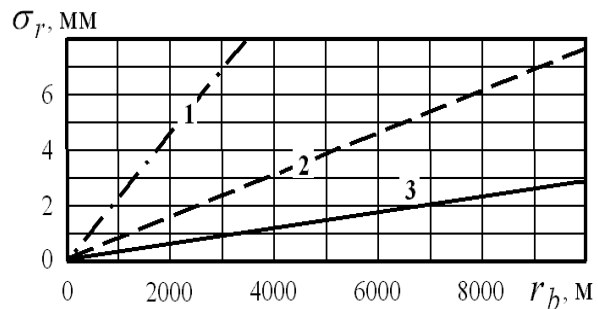


Рис. 6. Ошибка измерения базового расстояния при $L_1 = -90, -100, -110$ дБ/Гц соответственно

Видно, что для измерения базового расстояния длиной несколько километров с трехмиллиметровой точностью фазовый шум генератора должен составлять

$$L_1 \approx -110 \text{ дБ/Гц.}$$

Заключення

Для целей синхронізації достаточного двох класов систем:

- с взаимной синхронізацією;
- с опорной от задающего генератора.

Использование в системе принципа синхронізації временных интервалов или передачи по обратной связи информации о временных интервалах, либо взаимная передача частот (фаз) и затем вычисление величин $T_1(t)$ и $T_2(t)$ перед дальнейшей обработкой приводят к значительно меньшим ошибкам, чем сначала измерение разности частот (фаз), а затем вычисление погрешности временных интервалов, что связано с неоптимальностью используемых систем ФАП или ЧАП (фазы и частоты), и нелинейностью операций вычисления временных интервалов.

Современные технологии позволяют поддерживать достаточно высокую временную синхронізацию двух разнесенных позиций. Эксперименты с двухсторонней связью через спутник связи показали возможность получения разницы времени менее 1 нс для станций, разнесенных на несколько сотен километров.

Рассмотренный выше метод синхронізации для небольших базовых расстояний при использовании недорогих GPS-приемников – позволяет получить рассогласование времени менее 5 нс для подвижных станций.

Частотная синхронізация зависит от вида обработки и может наблюдаться в интервале от микро-секунд до нескольких секунд, что имеет место для интерферометрических радиолокационных станций с синтезированной апертурой, где базовое расстояние должно быть измерено с точностью нескольких миллиметров. Показано, что фазовый шум оказывает большое влияние на точность определения базового расстояния для удалений свыше нескольких километров.

Результаты работы могут быть использованы для решения задач передачи опорных колебаний и сигналов, фазирования разнесенных позиций.

Литература

1. Громаков Ю.А., Голяницкий И.А., Шевцов В.А. Оптимальная обработка радиосигналов большими системами. – М.: Эко-Трендз, 2004. – 260 с.
2. Линдсей В. Системы синхронізации в связи и управлении. Пер с англ. (Нью-Джерси, 1972) / Под ред. Ю.Н. Бакаева и М.В. Капранова. – М. Сов. радио, 1978. – 600 с.
3. Синхронізация от GPS. – [Электр. ресурс]. – Режим доступа: www.ecomm.kiev.ua/gps/primen/.
4. MacDoran P.F. Satellite emission radio interferometric earth surveying // SERIES – GPS geodetic system. – Bull. Géodésique. – 1979.
5. Kirchner D. Two-way time transfer via communication satellites // Proceedings of the IEEE. – 1991. – Vol. 79, No. 7. – P. 983 – 990.
6. Kirk J.C. Bistatic SAR motion compensation // IEEE Int. Radar Conf. – 1985. – P. 360 – 365.
7. Poseidon Scientific Instruments – [Электр. ресурс]. – Режим доступа: www.psi.com.au/.
8. Auterman J.L. Phase stability requirements for bistatic SAR // IEEE National Radar Conference. – Atlanta. – 13-14 March 1984. – P. 48 – 52.
9. Гофманн-Велленгоф Б., Ліхтенеггер Г., Коллінз Д. Глобальна система визначення місцеположення (GPS): Теорія і практика. – К.: Наук. думка, 1995. – 380 с.
10. Радиотехнические системы / Ю.П. Гришин, В.П. Ипатов, Ю.М. Казаринов и др.; под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Высш. шк., 1990. – 496 с.

Поступила в редакцию 1.12.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил, Харьков.